



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

LAURI METSOVUORI
SULAMISPAINUMINEN RADAN EPÄTASAISUUDEN
AIHEUTTAJANA
Diplomityö

Tarkastaja:
Professori Antti Nurmikolu
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tuotantotalouden ja rakentamisen
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
5. kesäkuuta 2013

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

METSOVUORI, LAURI: Sulamispainuminen radan epätasaisuuden aiheuttajana

Diplomityö, 93 sivua

Syyskuu 2013

Pääaine: Yhdyskuntarakentaminen

Tarkastaja: professori Antti Nurmikolu

Avainsanat: sulamispehmeneminen, sulamispainuma, tukikerros, alusrakenne

Osana elinkaaritehokkaan radan tutkimushanketta on Suomen rataverkolla esiintyvien routaongelmien esiintymistä ja syitä kartoitettu monitoroimalla ratapenkereen tilaa useissa kohteissa ympäri maata. Mittauspisteet ovat olleet toiminnassa kohteesta riippuen vuosina 2008–2013 havainnoinnin osittain edelleen jatkuessa. Ratapölkyn päistä mitattujen siirtymien perusteella on keväisin todettu routanousujen sulamisen jälkeen tapahtuvan painumista, joka poikkeaa normaalisti tukikerroksen kulumisesta johtuvasta ratapölkkyjen korkeusaseman muuttumisesta.

Tässä työssä on selvitetty jäätymis-sulamissyklin aiheuttamia muutoksia maassa ja sen vaikutuksia muodonmuutosominaisuuksiin erityyppisissä maamateriaaleissa. Taavoitteena oli mittausaineistoon perustuen tutkia keväällä routanousun lähtötason alapuolelle syntyvän painuman syitä. Routalinssien sulettua routanousu tasaantuu, mutta tämän lisäksi käytännöllisesti katsoen routimattomissakin kohteissa pölkkyjen on todettu painuvan muutamia millimetrejä.

Mittausdatasta määritettiin syksyn ja kesän aikaiset raidesepelin kulumisnopeudet sekä talvenaikainen teoreettinen kulumisnopeus perustuen oletukseen, että kaikki painuma olisi hienontuneen sepelin tiivistymistä keväällä sulamisen jälkeen. Paras kulumisnopeuden riippuvuus bruttoliikennekuormituksesta havaittiin kesän ja syksyn kulumisnopeuksien keskiarvolla. Tämän perusteella pääteltiin keväällä tapahtuvien painumien johtuvan jostain muustakin tekijästä kuin sepelin hienonemisesta. Sulamispainumille ei ollut osoitettavissa yksiselitteistä riippuvuutta tietystä jäätymis-sulamissyklin aikaisesta muutoksesta kuten routimisen määrästä, routan tunkeutumisvyvyydestä tai rakenteen sulamisnopeudesta.

Routimattomissa kohteissa suurin osa sulamispainumasta tapahtui tukikerroksen sulamisen aikana. Näissä kohteissa voitiin päätellä sepelin talviaikaisen kulumisen aiheuttavan painumista keväällä tukikerroksen sulamisen yhteydessä. Sepelin koko vuoden kulumisnopeuden riippuvuus liikennekuormituksesta jäi kaikilla kohteilla jonkin verran sulan ajan riippuvuutta huonommaksi, minkä perusteella pääteltiin sulamispainumien johtuvan osassa kohteista myös jäätymis-sulamissyklin aiheuttamista muutoksista. Rakennemateriaalit olivat pääosin kelpollisia nykyisten rakeisuusohjealueiden näkökulmasta. Näin ollen ainoaksi sulamisen jälkeen syntyviä pysyviä muodonmuutoksia selittävänä tekijänä jäi kosteustilan muutoksen aiheuttama jäykkyyden aleneminen. Tämän vahvistaminen vaatisi kuitenkin kenttämittauksia tuekseen.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

METSOVUORI, LAURI: Thaw settlement as cause of railway track unevenness

Master of Science Thesis, 93 pages

September 2013

Major: Municipality Engineering

Examiner: Professor Antti Nurmikolu

Keywords: thaw weakening, thaw settlement, ballast bed, substructure

The condition of railway embankments has been monitored at several locations across Finland to chart the occurrence and causes of frost heave problems as part of the Life Cycle Efficient Railway Track research project. Instrumented sites have been in operation from 2008 to 2013 and monitoring still continues at certain sites. The measured displacements of sleeper ends indicate settling in spring that deviates from the change in elevation of sleepers normally caused by wear of the ballast bed.

The literature review part explains how the freeze-thaw cycle affects in the soil and the deformation properties of different soil types. The main goal was to find out why sleepers settle below the starting level of frost heave in spring. Even at sites where frost heave does not occur sleepers have been noticed to have settled a few millimetres below the starting level after the frost lenses have melted.

The measured displacement data were used to calculate ballast wear rate separately for summer and autumn. A theoretical winter wear rate based on the assumption that winter-time degradation of ballast caused all of the settling after thawing was also calculated. The highest dependence of wear rate on gross traffic load was achieved using the average of summer and autumn wearing rates. Accordingly, it was deduced that spring-time settlement was due to something else than wear and compaction of ballast. No clear-cut dependence between settling and a certain change during the freeze-thaw cycle – like in the level of frost heave, frost penetration depth or thawing rate of the embankment – could be detected.

At non-frost-susceptible sites, most thaw settling took place during thawing of the ballast bed. There, the apparent reason for settling was the compaction of the degraded ballast. The dependence of the ballast's annual wear rate on traffic load was lower than the summer and autumn average at all sites. This led to the conclusion that at least part of the springtime settling was caused by changes resulting from freeze-thaw cycle. Grading of the most aggregates used in the monitored embankments met the current requirements. Thus, the only factor that can explain the permanent deformations occurring after thawing is the reduced stiffness of the embankment due to a change in moisture conditions. Confirmation of that would, however, require field measurements.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitoksen Maa- ja pohjarakenteiden yksikössä. Työ on osa Liikenneviraston rahoittamaa laajaa ratojen elinkaaritehokkuuteen liittyvää tutkimushanketta ja liittyy sen routaa käsittelevään osa-alueeseen.

Työn tekemistä edesauttoi huomattavasti osittain valmis mittaus- ja tausta-aineisto. Koekohteiden näytteidenotto ja laboratoriotutkimukset oli tehty kahden aikaisemman projektin yhteydessä. Varsinainen mittausdata oli osin työstetyssä muodossa, mikä nopeutti merkittävästi tätä työtä varten tehtyjen lisäysten ja muutosten tekemistä.

Haasteita tuotti niukka teoreettinen tausta-aineisto, koska työn tekemisen yhteydessä ei löytynyt ainuttakaan lähdeviitettä, joka olisi käsitellyt nimenomaan ratojen jääty-mis-sulamissyklin aikaisia tapahtumia. Teoriaa joutui ammentamaan tierakentamisen alalla tehdystä tutkimuksesta ja erilaisille luonnontilaisille maamateriaaleille tehdyistä laboratoriotutkimuksista. Kanadassa ja Venäjällä, missä esiintyy laajoja ikirouta-alueita, on luonnontilaisten maakerrostumien käyttäytymistä sulamisen aikana tutkittu merkittävässä määrin.

Tahdon esittää erityiset kiitokset professori Antti Nurmikolulle rakentavasta ja jä-mäkästä ohjauksesta, jonka avulla opinnäytteen tekeminen onnistui aiemmin niukasti käsitellystä aiheesta. Tutkimuksen käytännön seikkoihin liittyvästä avusta haluan esittää kiitokset DI Heikki Luomalalle ja DI Kari Pylkkäselle TTY:n Maa- ja pohjarakenteiden yksiköstä.

Erityistä hyötyä osittain uusien ja monimutkaisten asioiden jäsentelyyn tarjosivat lukuisat keskustelut toisen samaan aihepiiriin liittyvän opinnäytteen tekijän kanssa, jo-ten kiitokset myös Marja Isohaalle.

Tampereella 18.9.2013

Lauri Metsovuori

SISÄLLYS

1	Johdanto	1
2	Ratarakenteen suunnittelu ja ympäristöstä aiheutuvat rasitukset.....	3
2.1	Painumien hallinta radan suunnittelussa	3
2.1.1	Nykykäytäntö	3
2.1.2	Vanhojen rataosien nykytilaan johtaneet tekijät	5
2.2	Ratarakenteen routamitoitus ja routaantuminen.....	6
2.2.1	Suunnittelu ja sovelletut korjaustoimenpiteet	6
2.2.2	Routimisesta aiheutuvat haitat	7
2.2.3	Raiteiden kunnon seuranta	8
2.3	Routaantuminen ja siihen vaikuttavat tekijät	9
2.4	Routaantumisen vaikutukset maan mekaanisiin ominaisuuksiin.....	11
2.4.1	Jäätymisen aiheuttamat muutokset kitkamaalajeissa	11
2.4.2	Jäätymisen aiheuttamat muutokset savessa.....	13
3	Painuminen ja sulamisen aiheuttamat muutokset	14
3.1	Painumalajit.....	14
3.2	Sulamisen eteneminen rakenteessa	16
3.3	Sulamisen vaikutus koheesiomaalajien mekaaniseen toimintaan	19
3.3.1	Sulamiskonsolidaatio	19
3.3.2	Lujuusominaisuuksien muutokset.....	26
3.4	Sulamisen vaikutus kitkamaalajien mekaaniseen toimintaan	28
3.4.1	In-situ routiminen ja sulamispainuminen.....	28
3.4.2	Resilient-ominaisuuksien muutokset sulaneessa maassa	30
3.5	Raidesepelin hienontuminen talvella ja hienontuneen materiaalin tiivistyminen sulamisen aikana	35
4	Ratakohteiden monitorointi.....	37
4.1	Instrumentointi	37
4.2	Kohteiden sijainnit ja rakenteet.....	39
4.2.1	Tukikerrokset	42
4.2.2	Alusrakenteet.....	44
4.2.3	Pohjamaa	48
4.2.4	Rataosien liikennekuormitus.....	50
5	Monitoroinnin havainnot ja painumien riippuvuus eri tekijöistä.....	53
5.1	Routiminen ja sulamispainumahavainnot	53
5.2	Yhteenvedo rakenteista ja niiden havaitusta käyttäytymisestä.....	68
5.3	Raidesepelin hienonemismoisuus eri vuodenaikoina.....	70
5.3.1	Syyskauden kulumismoisuus	70
5.3.2	Kesäkauden kulumismoisuus	72
5.3.3	Talvikauden teoreettinen kulumismoisuus.....	74
5.3.4	Sulan ja jäätyneen ajan kulumismoisuuksien riippuvuus liikennekuormituksesta	76

5.3.5	Havaittu painuminen rakenteen ollessa jäässä	78
5.3.6	Sepelin hienontumisen aiheuttama tiivistymisnopeus verrattuna havaittuun ja laskettuun painumisnopeuteen	78
5.4	Sulamispainuman riippuvuus jäätymis-sulamissyklin aikaisista muutoksista	79
5.4.1	Riippuvuus rakenteen sulamisnopeudesta.....	79
5.4.2	Riippuvuus routanousun suuruudesta	81
5.4.3	Riippuvuus roudan tunkeutumisvyvyydestä.....	83
5.4.4	Rakenteen kosteustilan muutokset sulamisen aikana.....	85
6	Päätelmät painumien syistä	87
	Lähteet.....	90

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Latinalaiset kirjaimet

\bar{A}	Sulamisesta aiheutuva huokosluvun muutos
\bar{a}	Huokosluvun riippuvuus kuormituksesta
a	Vakio 100
B	Sulamiskonsolidaatioon liittyvä vakio
b	Kuormituskertaluvun eksponentti
c	Koheesio
c_{vu}	Maan sulan tilan tilavuuslämpökapasiteetti
e	Neperin luku
e_0	Jäätyneen maan huokosluku
$(\Delta e)_p$	Kuormitusta vastaava huokosluvun muutos
e_{th}	Sulaneen tilan huokosluku
h	Kerrospaksuus
h_i	Tarkasteltavan kerroksen paksuus
Δh_i	In-situ routimisesta aiheutuva routanousu
k_u	Lämmönjohtavuus
L	Latenttilämpö tilavuusyksikköä kohden
m_v	Maan kokoonpuristuvuuskerroin
N	Kuormituskertaluku
n	Maakerroksen huokoisuus
p	Kuormitus
p	Keskimääräinen pääjännitys
P_0	Pintakuorma
q	Deviatorinen jännitys
$q_{failure}$	Staattisen murtojännityksen arvo
R	Sulamiskonsolidaatiosuhde
S_{max}	Kokonaispainuma
s_t	Kokonaispainuma
t	Aika sekunneissa
T_s	Vakiolämpötila maan pinnalla
u	Huokosvedenpaine
u_a	Ilmanpaine
u_w	Huokosvedenpaine
V	Tilavuus
ΔV	Tilavuuden muutos
x	Tarkastelusyvyys sulaneessa kerroksessa
X	Sulamissyvyys metreissä
Z	Yksikötön syvyysmuuttuja

Kreikkalaiset kirjaimet

α	Sulamisvakio
α_u	Sulan maan lämmön tasoittumiskerroin
γ'	Sulan maan tehokas tilavuuspaino
γ_f	Jäätyneen maan irtotilavuuspaino
γ_t	Sulaneen maan irtotilavuuspaino
ε_i	Sulavaan kerrokseen syntyvä puristuma
ε_p	Plastinen muodonmuutos
π	Pii
$\Delta\sigma$	Kuormituksen muutos
$\Delta\sigma'$	Maassa vallitsevan tehokkaan jännityksen muutos
τ	Leikkauslujuus
φ	Kitkakulma
χ	Kokeellisesti määritettävä maan kyllästysasteesta riippuva kerroin

Lyhenteet ja nimitykset

erf	Virhefunktio
Ste	Stefanin luku

1 JOHDANTO

Osana Liikenneviraston ylläpitämää tutkimus- ja kehitystoimintaa Tampereen teknillisellä yliopistolla on ollut vuodesta 2009 käynnissä Tutkimushanke Elinkaaritehokas Rata (TERA), jonka toinen vaihe käynnistyi vuoden 2013 alussa. Tavoitteena on hankkia tietoa ja kehittää menetelmiä radan kunnan tehokkaaseen hallintaan elinkaaren aikana. Tämän työ liittyy hankkeen routaa ja routimisen haittoja käsittelevään tutkimusalueeseen.

Tutkimushankkeeseen liittyen rataverkolla on monitoroitu eripuolilla Suomea vuosina 2008–2013 14 kohteessa ratapenkereen lämpötilaprofiilia, kosteustilaa, ilman lämpötilaa ja ratapölkkyjen päiden siirtymiä. Monitorointi jatkuu edelleen osassa kohteita. Instrumentoinnin ja näytteenoton avulla on haluttu selvittää rakenteen ja ympäristöolosuhteiden vaikutusta routaantumiseen, routanousun syntymiseen ja sulamisen aikaisiin tapahtumiin. Jäätymisen ja sulamisen aiheuttamat muodonmuutokset haittaavat merkittävästi radan liikennöitävyyttä ja lisäävät kunnossapitotarvetta. Routimisesta johtuvat ongelmat ovat olleet pitkään kunnossapitäjien ja suunnittelijoiden tiedossa, mutta monitoroinnin yhteydessä on havaittu roudan sulamisen jälkeen nopeasti syntyvää ratapölkkyjen pysyvää painumaa. Maalis-huhtikuulle ajoittuu myös vuodesta riippuen suuri osa roudasta johtuvia nopeusrajoituksia.

Tierakentamisen alalla sulamispehmeneminen on huomattavasti vakavampi haitta erityisesti alempiluokkaisella ja päällystämättömällä tieverkolla, ja sen merkitys liikennöitävyyden kannalta on tiedostettu pitkään. Tämän takia maailmalla rakenteen sulamiseen liittyvän tutkimuksen painopiste on ollut teiden ongelmissa. Myös luonnonmaakerrosten toimintaa jäätymisen ja sulamisen aikana on tutkittu paljon, koska pohjoisilla alueilla vuotuinen jäätymis-sulamissykli tai ikiroudan osittainen sulaminen aiheuttavat haasteita kaikelle rakentamiselle. Tässä työssä on tarkoitus selvittää sulamiskauden aikaisen painumisen syitä raiteiden epätasaisuuden aiheuttajana ja sen riippuvuutta eri tekijöistä. Selitystä painumisen syntymekanismille täytyy hakea jäätymisen aikana maassa tapahtuvista muutoksista. Näin on mahdollista päästä kiinni niihin sulamisen aikaisiin tekijöihin, jotka aiheuttavat pehmenemistä ja kuormitettaessa normaalia suurempia painumia. Seurantakohteista otettujen rakenne- ja pohjamaanäytteiden perusteella pyritään selvittämään, kuinka vahvasti ongelma johtuu materiaaliominaisuuksista. Toisaalta roudansyvyys- ja kosteuspitoisuustietojen avulla voidaan valaista pehmenemisen yhteyttä toteutuneeseen routimiseen ja kosteustilamuutoksiin. Tukikerroksen sepelin voidaan olettaa hienontuvan myös talvikaudella liikennekuormituksen johdosta, mutta kerroksen

ainakin osittainen jäätyminen estää sen uudelleen järjestymisen. Keväällä sulamisen jälkeen tukikerroksella on mahdollisuus tiivistyä uutta rakeisuutta vastaavaan tilaan, mikä osaltaan voi aiheuttaa ratapölkkyjen painumista.

Toisessa luvussa käydään läpi yleisesti ratarakenteeseen muodonmuutoksia aiheuttavia tekijöitä ja niiden hallintaa. Vanhoihin ratapenkereisiin ja raidegeometriaan aiheutuu haitallisia muutoksia sellaisista syistä, jotka nykyisen suunnitteluohjeistuksen mukaan toimittaessa pystytään tehokkaasti välttämään. Suurin yksittäinen ongelma liikennöityvyyden kannalta on routa, jonka seurauksena aiheutuu paljon pistemäistä kunnossapitotarvetta ja nopeusrajoituksia liikenteelle.

Kolmannessa luvussa esitetään kuinka jäätymis-sulamissykli vaikuttaa maan mekaaniseen toimintaan syklin eri vaiheissa. Sulamispehmenemiseen liittyviä muutoksia käydään läpi kitka- ja koheesiomaalajien osalta erikseen, koska näiden käyttäytyminen poikkeaa merkittävästi toisistaan erilaisen vedenpidätyskyvyn takia. Koheesiomaalajien tiedetään olevan alttiita routimiselle, jos lämpötila- ja kosteusolosuhteet vähänkin antavat siihen mahdollisuuden. Näissä maalajeissa rakenteessa routimisen yhteydessä tapahtuvat muutokset aiheuttavat niiden erityistä heikkenemistä sulamisen aikana ja välittömästi sen jälkeen. Radan rakennettujen kerrosten lisäksi on pohjamaalla merkittävä vaikutus radan rakenteen jäykkyyteen ja sitä kautta muodonmuutuskäyttäytymiseen. Radan rakennekerroksissa käytettävät murskatut kalliokiviainekset tai lajittuneet luonnonmaalajit eivät kitkamaalajeina kärsi yhtä merkittävää lujuuskatoa kuin hienorakeiset luonnonmaat. Kuitenkin näiden rakennemateriaalien resiliient-ominaisuuksien, eli kimmoisen vasteen toistokuormituksessa, on todettu heikentyvän merkittävästi suurilla vesipitoisuuksilla ja erityisesti sulamisen yhteydessä. Kuormitustason pysyessä vakiona resiliient-moduulin pieneneminen johtaa suurempiin kokonaismuodonmuutoksiin ja yleensä myös suurempiin pysyviin muodonmuutoksiin.

Neljännessä luvussa esitellään tarkasteltavien monitorointikohteiden instrumentointi ja käydään läpi rakenteiden materiaalien kelpoisuutta nykyisten mitoitusohjeiden näkökulmasta. Rataosien liikennekuormitus ja vuotuiset muutokset on esitelty kokonaisliikenteen brutto- ja tavaraliikenteen nettokuormituksien osalta.

Viidennessä luvussa esitetään monitoroinnin tuloksena saadut pölkkyjen siirtymä- ja roudansyvyystiedot, joiden perusteella jäätymis-sulamissyklin aikaisia muutoksia on parametrisoitu. Tämän perusteella on laskettu kesä- ja syysajan raidesepelin hienonemisesta johtuvat painumanopeudet ja verrattu näitä talvikauden jälkeen syntyviin sulamispainumiin olettaen niidenkin johtuvan sepelin hienonemisesta. Sulamispainumien riippuvuutta roudan sulamisnopeudesta, tunkeutumissyvyydestä ja routanousuista on käsitelty perustuen kirjallisuudesta saatuun tietoon jäätymis-sulamissyklin aikaisista muutoksista maassa. Kosteustilan muutoksen vaikutuksia on käyty läpi tarkastelemalla esi-merkinomaisesti yhtä kohdetta usean vuoden tarkastelujaksolla.

2 RATARAKENTEEN SUUNNITTELU JA YMPÄRISTÖSTÄ AIHEUTUVAT RASITUKSET

Radan rakenteeseen ja pohjamaahan syntyviä muodonmuutoksia pyritään hallitsemaan sekä suunnittelun että käytön aikaisilla toimenpiteillä. Muodonmuutoksia aiheuttavia tekijöitä ovat pohjamaan painuminen ratarakenteen painon johdosta, pohjamaan ja radan rakenteen deformatuminen liikennekuormituksen takia ja routimisesta aiheutuvat kauksittaiset routanousut. Keväisin tapahtuva nopea tai voimakas deformatuminen voidaan jaotella johtuvaksi sekä sulamisen aiheuttamasta rakenteen heikkenemisestä että kuormituksen aiheuttamista muodonmuutoksista.

Rataa suunniteltaessa pyritään tilanteeseen, missä kokonaispainumat ja painumaerot eivät haittaa liikennöintiä käytön aikana (RATO 3). Liikennöinnin tiedetään aiheuttavan tukikerroksessa hienonemista ja muodonmuutoksia, jotka liikennöitävyyden säilyttämiseksi edellyttävät kunnossapitotoimenpiteitä kuten tukikerroksen seulontaa ja raiteen tukemista (Nurmikolu 2004). Lisäksi liikennekuormituksen on todettu pohjamaan jäykkyydestä riippuen mobilisoivan rakenteeseen leikkausjännityksiä, joiden johdosta pengermuoto latistuu ajan myötä. Ratarakenteen deformatuminen on monimutkainen kokonaisuus, jossa moni tekijä vaikuttaa toisiinsa ja yksittäisten muodonmuutosten syitä on ajoittain vaikea erottaa toisistaan.

2.1 Painumien hallinta radan suunnittelussa

2.1.1 Nykykäytäntö

Ratateknisten ohjeiden osa 3 ”Radan rakenne” esittää yleiset ratojen geotekniset suunnitteluperusteet, joita voidaan tarkentaa hankekohtaisilla suunnitteluperusteilla. Taulukossa 2.1 on esitetty RATO 3:n mukaiset sallitut kokonaispainumat ja painumista johtuvien kaltevuusmuutoksien raja-arvot linjaosuuksilla. Vaihtoeuilla sovelletaan aina alusrakenneluokan 4 arvoja. Liian äkilliset tai suuret painumat johtaisivat vakaviin raiteen geometriavirheisiin ja niistä johtuvaan merkittävään kunnossapitotarpeen kasvamiseen.

Taulukko 2.1. Tasaisen kokonaispainuman sekä pituus- ja sivuttaiskaltevuuden muutoksen enimmäisarvot (RATO 3).

Radan alusrakenneluokka	Painuma-aika 100 vuotta	Painuma-aika 0...2 vuotta		Painuma-aika 2...9 vuotta	
	Tasainen kokonaispainuma [mm]	Pituuskaltevuuden muutos [%]	Sivuttaiskaltevuuden muutos [%]	Pituuskaltevuuden muutos [%]	Sivuttaiskaltevuuden muutos [%]
0	800	0,4	0,8	0,4	0,8
1	800	0,3	0,6	0,3	0,6
2	500	0,2	0,4	0,2	0,4
3	300	0,15	0,3	0,15	0,3
4	100	0,1	0,2	0,1	0,2

Geoteknisessä suunnittelussa sovelletaan voimassa olevaa Eurokoodien osaa 7 (SFS-EN 1997) ja sen kansallisia liitteitä sekä Liikenneviraston Eurokoodin soveltamisohjetta Geotekninen suunnittelu – NCCI 7. Painumien osalta Eurokoodi ei tarjoa juurikaan laskennallisia työkaluja vaan yleisiä periaatteita. SFS-EN 1997 osan 1 kohdassa 6.6.2. todetaan, että osittain tai täysin vedellä kyllästetyssä maassa tulee huomioida välitön, konsolidaatio- ja viruman aiheuttama painuma. Myös orgaanisten maalajien virumisen aiheuttaman painuman pitkäkestoisuuteen kehoitetaan kiinnittämään erityisesti huomiota. Opastavassa liitteessä F on esitetty esimerkkimenetelmiä painumien arvioimiseksi. Koheesio- ja kitkamaille voidaan käyttää jännitys-muodonmuutosmenetelmää tai sovelletua kimmoteoriaa. Varsinaisia laskennallisia menetelmiä ei ole esitetty.

Suunnitteluprosessin aikana tulee pohja- ja laboratoriotutkimusten perusteella tunnistaa, mitkä painumalajit tulevat määrääviksi tarkasteltavissa pohjamaaolosuhteissa. RATO 3:ssa on annettu mahdollisuus soveltaa muita Liikenneviraston tai vanhan Tiehallinnon suunnitteluohjeita soveltuvilta osin. Tien perustamistavan valinta –ohjeessa annetaan lähtökohdaksi primäärin konsolidaatiopainuman laskeminen heikoimmassa kohtaa ilman vahvistustoimenpiteitä, jonka jälkeen tarkasteluväliä tiheennetään painumaraja-arvojen alittuessa. Sekundääripainuma tulee ohjeen mukaan tarkastella erikseen. Perustettaessa penkereitä pehmeiköille tulee huomioida myös leikkausjännityksistä johtuvat sivuttaissiirtymät kokonaispainumia laskettaessa.

Suunnittelun yhteydessä valitaan pohjanvahvistusmenetelmät siten, että lähtökohtaisesti rata perustetaan painumattomaksi, mutta kustannussyistä voidaan sallia painumia taulukossa 2.1 esitettyihin raja-arvoihin asti. Painumien määrää ja nopeutta tulee seurata rakentamisen aikana ja jälkeen, jotta maan ennustetun mukaisesta käyttäytymisestä voidaan varmistua. NCCI 7 ohjeistaa kohdassa 3.3 täydentämään ennustettua käyttäytymistä seurantamittauksilla erityisesti laskennallisen ennustamisen ollessa vaikeaa. Tällöin tulee asettaa jo suunniteltaessa hälytysrajat muodonmuutoksille, joiden ylittyessä ryhdytään toimenpiteisiin.

RATO 3:ssa on esitetty vaatimukset myös radan palautuville painumille siten, että penkereen tulee joustaa tietyissä rajoissa rataosalla suurimmalla sallitulla akselipainolla liikennöitäessä. Uusilla radoilla vaihteluväli tulee olla ratapölkystä mitattuna 1...3 mm ja olemassa olevilla radoilla 1...10 mm. Turvepohjamailla sallitaan uusillekin radoille 5 mm palautuva painuma. Rataa ei siis voida perustaa niin jäykäksi kuin mahdollista, vaan sopivansuuruisen kimmoisen vasteen avulla saadaan se kestävämpään paremmin dynaamista junakuormitusta.

2.1.2 Vanhojen rataosien nykytilaan johtaneet tekijät

Rataverkon historian saatossa suurin osa ratojen pohja- ja alusrakenteista on suunniteltu huomattavasti nykyistä suppeamman geoteknisen tietämyksen puitteissa. Myös kaluston painojen ja nopeuksien asettamat vaatimukset ovat olleet nykyisiä huomattavasti alhaisempia, jolloin kuormitukset eivät ole edellyttäneet yhtä jäykkiä ja muodonmuutoksia vastustavia maarakenteita kuin nykyään.

Saارين (2008) tutki diplomityössään Suomessa historian saatossa radoille asetettuja rakenne- ja materiaalivaatimuksia. Nykyinen rakennejaottelu eristys-, väli- ja tukikerrokseen on ollut voimassa vasta 1960-luvulta lähtien. Rakeisuusvaatimukset lajittuneille luonnonmateriaaleille eli hiekalle ja soralle ovat olleet samat vuodesta 1970. Materiaalien laadunvalvonta on perustunut tähän asti lähes pelkästään silmäämääräiseen tarkasteluun seulontojen sijasta. Perusparannuksia tehtiin 1950- ja 60-luvuilla tuon ajan vaatimuksiin nähden puutteellisille radoille, jolloin ratojen stabiliteettia ja routimishaittoja pyrittiin vähentämään systemaattisesti. Pääasiallisina keinoina olivat korkeusviivan korottaminen, kuivatuksen parantaminen ja siirtymäkiilojen rakentaminen.

Rakenteiden korjauksien yhteydessä materiaalia on usein lisätty vanhan penkereen kylkeen joko toispuoleisesti tai molemmin puolin. Joskus vanha raidesorakerros on saatettu levittää tasaisesti ennen rakenteen leveyden kasvattamista. Yhtenäistä toimintatapaa perusparantamisten yhteydessä ei ole ollut. Yhdessä routimishaittoja ehkäisevään korkeusviivan korottamisen kanssa menettely on voinut johtaa paikoin hyvin epähomogeeniseen rakenteeseen, jossa osa alusrakenteesta voi olla selkeästi routivaa ja osa routimatonta. Liikennekuormituksen ja pengerpaksuuden kasvattaminen ilman pohjanvahvistustoimenpiteitä on voinut johtaa penkereen epätasaiseen painumiseen ja pohjamaan kokoonpuristumiseen ajan saatossa. Tämä on tuottanut haasteita korjaushankkeissa pohjamaan lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien määrittämisessä erityisesti eloperäisten maalajien kohdalla. Pengerpaksuuden ja pohjamaan ominaisuuksien vaihtelut saatavat lyhyelläkin matkalla aiheuttaa merkittäviä eroja routimisominaisuuksissa ja lämmöneristyskyvyssä.

2.2 Ratarakenteen routamitoitus ja routaantuminen

2.2.1 Suunnittelu ja sovelletut korjaustoimenpiteet

Nykyisen RATO 3:ssa olevan ohjeistuksen mukaan uudet radat rakennetaan käytännöllisesti katsoen routimattomiksi, kun alapuolinen pohjamaa ei pääse jäätymään tilastollisesti kerran 50 vuodessa toistuvan pakkasmäärän vaikutuksesta (RATO 3). Käytännössä tämä on johtanut siihen, että routamitoitus on määräävä tekijä pengerpaksuuden kannalta, eikä erillistä kantavuusmitoitusta tehdä. Ilmasto-oloista riippuen tämä johtaa 2,0–2,6 metrin routimattomaan rakennekerrospaksuuteen. Maamateriaalien erilainen lämmöneristävyys on huomioitu siten, että kalliomurskeista rakennettujen kerrosten paksuutta tulee kasvattaa eristys- ja välikerroksen osalta 15 % luonnon hiekkaan ja soraan verrattuna (RATO 3).

Valtaosa Suomen rataverkosta on rakennettu ennen 1960-lukua, jonka jälkeen tietämys routaantumisesta ja routimisilmiöstä on kasvanut huomattavasti. Samoihin aikoihin routimisilmiön hallintaa alettiin lähestyä systemaattisen tutkimuksen keinoin, koska kaikkia ongelmia oli mahdotonta korjata, ja syntyi tarve kehittää tarkoituksenmukaisia korjausratkaisuja vaatimuksiltaan eritasoisille rataosille. Saarisen (2008) tekemästä selvityksestä käy ilmi, kuinka historian saatossa rakennetuille rataosille ei ole tehty varsinaista routamitoitusta lainkaan. 1900-luvun alkupuolella routimista pyrittiin rajoittamaan matalilla 0,5–1,0 metrin syvyisillä massanvaihdolla, koska varsinaisten rakennekerroksien paksuudet olivat tyyppipoikkileikkauksissa vain 0,5 metrin luokkaa. Kun 1960-luvulla otettiin käyttöön poikkileikkauksia, jotka sisälsivät routaa eristäviä 0,6–1,2 metrin paksuisia rakennekerroksia, alettiin kiinnittää huomiota myös alapuolisen pengermateriaalin routimattomuuteen. Tällöin ohjeistettiin, että pengermateriaalin tuli olla routimatonta 1,2–1,8 metrin syvyyteen korkeusviivasta.

Jatkuvakiskoraiteisiin ja sähkövetoiseen kalustoon siirtyminen on mahdollistanut suuremmat matkanopeudet höyry- ja dieselvetoiseen kalustoon nähden, jolloin myös kiskojen tasaisuusvaatimus on luonnollisesti suurempi. Tällöin routimisesta ja muista syistä johtuvat pienetkin muutokset kiskojen suunnittelussa geometriassa heikentävät matkustusmukavuutta ja pahimmassa tapauksessa voivat heiton takia suistaa vaunun kiskoilta. Epätasaisuudet aiheuttavat dynaamisen junakuormituksen takia myös vaarallisen suurien kiskoihin kohdistuvia pyörävoimia, mikä voi johtaa kiskojen vaurioitumiseen ja niiden eliniän lyhenemiseen.

Edellä esitetyistä syistä Suomen rataverkon eri osat ovat alusrakenteen osalta hyvin epähomogeenisessä kunnossa. Osa tärkeimmistä rataosuuksista on peruskorjattu nykyisiä vaatimuksia vastaavaksi, mutta osalla tasonnosto on jäänyt korjausajankohdan vaatimuksia ja tietämystä vastaavalle tasolle. Tämän takia osalla radoista esiintyy haitallisessa määrin routanousua lähes joka talvi. (Saarinen 2008.) Pengerpaksuuden ohella

routaongelmia aiheuttavat myös vääränlaiset ja routivat rakennekerrosmateriaalit sekä kuormituksen johdosta hienontunut tukikerroksen sepeli (Nurmikolu 2006).

RATO 3:ssa on parannettavat vanhat radat luokitellaan routiviksi, harvoin routiviksi tai routimattomaksi sen mukaan, paljonko rakenteen paksuus eroaa uuden radan rakennepaksuudesta vastaavalla alueella. Ensisijainen korjaustoimenpide on routivien materiaalien vaihtaminen routimattomiin eli rakennepaksuuden kasvattaminen. Jos rakennepaksuutta ei voida kasvattaa, on tuki- ja välikerroksen väliin mahdollista asentaa korjaamisen yhteydessä routaeristelevy (RATO 3). Routaeristeinä käytettiin 1970-luvulta alkaen paisutettua polystyreeniä (EPS), jonka pitkäaikaiskestävyyssominaisuudet on sittemmin todettu riittämättömiksi. Nykyään käytössä on yksinomaan suulakepuristettu polystyreeni (XPS). (Nurmikolu & Kolisoja 2001.)

2.2.2 Routimisesta aiheutuvat haitat

Vuosittain laadittava Roudan hallintaraportti (2012) kuvaa kattavasti routaongelman laajuuden ja keston koko rataverkolla. Raportti sisältää myös vertailutietoa edellisvuosien routaongelmista, mistä voidaan havaita ongelmien voimakas riippuvuus toteutuneista sääolosuhteista. Riittämättömän rakennepaksuuden ohella myös erilaiset epäjatkuvuuskohdat radan rakenteessa kuten rummut, siltojen päät, tasoristeys- ja vaihderakenteet ja kallioleikkausten rajakohdat aiheuttavat routaongelmia puutteellisten rakenteidensa takia.

Suurimmat routimisesta aiheutuvat haitat ovat päällysrakenteen lisääntynyt kunnossapitotarve ja nopeusrajoitukset, jotka edelleen aiheuttavat viivästyksiä junille. Kunnossapidon osalta RATO 15:n kohdassa 5.6 esitetyt toimenpidevaihtoehdot routanousuista johtuvien epätasaisuuksien korjaamiseksi ovat raiteen kiilaus ja poikkeuksellisesti sepelin osittainen poistaminen pölkyn alta. Käytännössä tämä tarkoittaa kunnossapitäjälle useita ylimääräisiä käyntejä kevätkaudella kunkin routanousuista kärsivän kohteen luona vuotuisesta routimistilanteesta riippuen. Kokonaisuutena routatilanteen vaatiman kunnossapitotarpeen hallinta on vaikea ja jatkuvasti muuttuva tehtävä, joka edellyttää jatkuvia seuranta- ja toimenpidekäyntejä kiilauskohteilla. Nopeusrajoitukset aiheuttavat säännölliselle liikenteelle myöhästymisiä, joihin on joinakin vuosina varauduttu liikennöitsijän toimesta ”routa-aikataulujen” käyttöönotolla kevätkaudella. On kuitenkin ilmeistä, että tällainen epäsäännöllinen normaaleista aikataulujärjestelyistä poikkeaminen aiheuttaa merkittäviä aikatappioita junaliikenteen käyttäjille. Suorien ylläpitokustannusten lisäksi myös matka-aikojen pidentymisestä syntyvät aikatappiot muodostavat kustannuksia, joiden merkitys voi kasvaa vuodesta riippuen suureksikin.

Routaongelmien riippuvuutta talven ankaruudesta kuvaa hyvin se, että alennettujen nopeusrajoitusten raidepituus voi vaihdella muutamasta kilometristä lähes tuhanteen kilometriin eri vuosien välillä. Osaltaan kunnossapidon varautuminen talveen on vaikuttanut rajoitusten asettamisherkkyyteen siten, että vaikean routatalven yllättäessä rajoituksia

on asetettu turhankin herkästi. Tämä selittää kuitenkin vain osan erosta eri vuosien välillä. Toisaalta samantasoista ilmastorasitusta vastaavina vuosina voi toisena vuonna nopeusrajoitettuja kilometrejä olla huomattavasti enemmän. (Roudan hallintaraportti 2012.) Näin ollen haitat eivät yksiselitteisesti riipu pakkasmäärästä, vaan pakkasmäärän jakautuminen pakkaskauden sisällä vaikuttaa routimisen voimakkuuteen.

Routineeseen maahan syntyneet jäälinssit sulavat keväällä ja niiden johdosta kiskoihin muodostuneet kiilaamista vaatineet nousut katoavat. Tässä kohtaa on suurin riski geometriavirheiden syntymiselle raiteisiin, kun sulava ja epätasaisesti routinut rakenne altistuu liikennekuormalle. Sulamisen jälkeen myös talven aikana hienontuneen sepelin on mahdollista tiivistyä liikennekuormituksen vaikutuksesta tiiviimpään tilaan.

2.2.3 Raiteiden kunnan seuranta

Raiteiden geometrian kuntoa seurataan tarkastusvaunumittauksilla, joissa mitataan raideleveys, kallistus, korkeuspoikkeama, kierous ja nuolikorkeus. Näiden suureiden tarkat määritelmät on esitetty RATO 13:ssa. Virheet raidegeometriassa on jaettu C-, D- ja *-luokkiin. C-luokka on alkava virhe, joka ei edellytä välittömiä kunnossapitotoimenpiteitä. D-luokan virhe tulee sisällyttää kunnossapitosuunnitelmaan ja korjata lähitulevaisuudessa; kuitenkin viimeistään ennen seuraavaa tarkastusta. Välitöntä korjausta ja mahdollista nopeusrajoitusta edellyttävä *-luokan virhe on luokituksessa vakavin. Tällöin nopeusrajoitus on laskettava niin alas, ettei mitattu virhe ole enää *-luokan virhe nopeusrajoitusta vastaavassa kunnossapitoluokassa.

Ratakilometrit arvostellaan mittausraportissa neljään luokkaan niillä esiintyneiden D-luokan virhemetrimäärien mukaan. *-luokan virhe aiheuttaa arvostelun tippumisen enintään tyydyttävään luokkaan. Arvosteltujen kilometrien perusteella rataosalle lasketaan geometrisen kunnan palvelutaso, joka antaa yleiskuvan geometrisesta kunnosta ja mahdollistaa rataosien vertailun keskenään.

Radat on jaettu kunnossapitotasoihin niiden liikenteellisten tarpeiden, päällysrakenteen ja maksiminopeuden mukaan siten, että tasot 1AA...3 koskevat pääraiteita ja 4...6 sekä pää- että sivuraiteita (RATO 13). Virherajojen suurusluokkien havainnollistamiseksi korkeuspoikkeaman osalta virheiden raja-arvot eri kunnossapitotasolla on esitetty taulukossa 2.2 ja kallistuspoikkeamien osalta taulukossa 2.3.

Taulukko 2.2. Korkeuspoikkeamien raja-arvot [mm], 5 metrin tulostuskannalla (RATO 13).

Virheluokka	Kunnossapitotaso							
	1AA	1A	1	2	3	4	5	6
C	2	2	3	4	5	6	7	8
D	4	4	5	6	7	8	9	10
*	7	7	8	9	10	12	13	14

Taulukko 2.3. Kallistuspoikkeamien raja-arvot [mm]. Kaarteissa kallistus ulkokaarteeseen päin on aina *-luokan virhe (RATO 13).

Virheluokka	Kunnossapitotaso							
	1AA	1A	1	2	3	4	5	6
C	3	3	4	5	6	8	9	10
D	5	5	6	7	8	10	13	15
*	8	8	9	11	12	15	19	21

Raja-arvot ovat etenkin korkeammilla kunnossapitotasoilla tiukkoja luvussa 2.2.1 esitetyistä syistä johtuen. Näin ollen pienetkin routanousut ja painumat sulamisen yhteydessä voivat yhdessä aiheuttaa virherajojen ylityksiä. Myös tasaisesti esiintyvät routanousut ja sulamispainumat lisäävät riskiä virheiden esiintymiselle rakenteen tai pohjamaan epäjatkuvuuskohdassa.

2.3 Routaantuminen ja siihen vaikuttavat tekijät

Lämpötilan laskiessa alle nollan celsiusasteen alkaa puhdas vesi jäätymään normaali-ilmanpaineessa. Näin ollen maalajista riippumatta alkaa maan huokosissa oleva vapaa kapillaarinen vesi jäätymään lämmön virratessa maan pinnalle nopeammin kuin uutta lämpöä nousee syvemmältä maasta jäätymään kerrokseen. Tällöin tapahtuu maan routaantuminen. (Ehrola 1996.)

Veden tiedetään sitoutuvan maarakeisiin kolmella eri tasolla; löyhemmin ja tiiviimmin sitoutuneena adsorptiovetenä sekä huokosissa liikkuvana kapillaarivetenä. Näiden lisäksi maassa on painovoimaisesti liikkuvaa vapaata vettä. Koska adsorptioveden sitoutuminen perustuu polaarisen vesimolekyylin ja negatiivisesti varautuneen maarakeen vuorovaikutukseen, aiheuttaa sidoksen muodostuminen muutoksia veden fysikaalisiin ominaisuuksiin kuten jäätymislämpötilaan. Myös veden sisältämät epäpuhtaudet ja erityisesti suola alentavat sen jäätymislämpötilaa kemiallisten ominaisuuksien muuttuessa. Kaikille maalajeille voidaan kokeellisesti määrittää jäätymättömänä pysyvän veden määrä lämpötilan funktiona. Veden sulana pysyminen on kuitenkin monimutkainen ilmiö, jossa maapartikkelien, jään, vesihöyryn ja tiukasti sitoutuneen jäätymättömän veden keskinäiseen vuorovaikutukseen vaikuttavat maapartikkelien ominaispinta-ala, fysikaalis-kemialliset ominaisuudet sekä ulkoiset tekijät kuten paine ja lämpötila. (Tsyto-

vich 1975.) Yleisesti voidaan kuitenkin todeta, että hienorakeisissa maissa esiintyy enemmän jäätyvätöntä vettä alle 0 °C:n lämpötiloissa, koska suuremmasta ominaispinta-alasta johtuen tiiviisti sitoutunutta adsorptiovetä esiintyy karkearakeisia maalajeja enemmän.

Hienorakeisilla mailla adsorptiovesi on keskittynyt erityisesti rakeiden kontaktipintojen ympärille huokoskulmavedeksi, jolloin veden vaikutus kontaktin lujuuteen on merkittävä. Jäätyvätöntä veden määrä lämpötilan laskiessa on maalajikohtainen ominaisuus, joka riippuu pitkälti maan huokoisuudesta. Tällöin hienorakeisessa maassa sulana pysyvän veden määrä voi olla verrattain suuri lämpötilan ollessa jo useita asteita pakkasella. Maan kokonaisvesipitoisuudella ei juuri ole vaikutusta jäätyvätöntä pysyvän veden määrään. Jäätyneelle maalle kehittyy nopeasti lujuutta huokosveden alettua jäätyä, mutta kehitys myös hidastuu äkkiä jo noin viiden pakkasasteen kohdalla. Myös tarkasteltavaan kerrokseen kohdistuva ulkoinen paine vaikuttaa merkittävästi jäätyvätöntä pysyvän veden määrään. (Tsytoich 1975.)

Routivaksi luokiteltavassa maalajissa sulan ja jäätyneen maan välillä olevaan osittain jäätyneeseen vyöhykkeeseen aiheutuu kulloinkin vallitsevan lämpötilagradientin johdosta jäätymisimupaine (cryo suction), joka pyrkii nostamaan vettä jäätyvään kerrokseen alapuolisesta sulasta maasta. Tällöin tapahtuu jäälinsin muodostusta eli jään segregatiota. Linssien muodostuminen kasvattaa maan tilavuutta, mikä voidaan havaita routanousuna maan pinnalla. (Ladanyi & Shen 1989.) Maalajin taipumusta routimiseen kuvaa *segregaatiopotentiaali*, joka voidaan määrittää laboratoriossa routanousukokeella. Routaantumisen yhteydessä tapahtuva jäälinsin muodostus ja maan tilavuuden kasvu eivät ole kuitenkaan maalajille mikään vakiosuuruinen muutos. Segregaatiopotentiaalteorian mukaan veden virtausnopeus V_0 muodostuvaan jäälinsiin on suoraan verrannollinen lämpötilagradienttiin $\text{grad } T$ kaavaan 2-1 mukaisesti (Konrad & Morgenstern 1981)

$$V_0 = SP_0 * \text{grad } T \quad (2-1)$$

jossa verrannollisuuskertoimenä maan routivuutta kuvaa segregatiopotentiaali SP_0 .

Myös routimattomiksi määritellyillä maalajeilla voidaan havaita routanousua *in-situ routimisen* johdosta, kun huokosissa olevan veden tilavuus kasvaa jäätyessä noin 9 % (Nixon 1982). Tällöin routanousun suuruus riippuu maan huokosrakenteesta ja huokosten tilavuudesta eli siitä, kuinka jäätyvä vesi pääsee laajentumaan kyllästymättömässä maassa kasvavan linssin ympärillä oleviin tyhjiin huokostiloihin.

Lämmön poistumisnopeuteen vaikuttavat maanpinnan lämpötilajakauma jäätyksen aikana, sulan ja jäätyneen maan tilavuuslämpökapasiteetit, lämmönjohtavuus ja veden jäätyislämpö. Vuotuinen ilman lämpötilavaihtelu vaikuttaa noin 10–15 metrin syvyy-

delle maanpinnasta, jossa vallitsee pysyvästi alueen vuotuinen keskilämpötila (Ehrola 1996). Näin ollen jäätymisnopeus riippuu maanpinnan yläpuolella vallitsevan lämpötilan ja edellä mainittujen materiaaliominaisuuksien lisäksi siitä, kuinka paljon maaperän yläosa varaa lämpöä itseensä pakkaskauden ulkopuolella.

Pakkasmäärällä kuvataan pakkaskauden keskilämpötilojen summaa ja yksikköinä tälle käytetään yleensä tuntiasteita ($h^{\circ}C$) (Ehrola 1996). Pakkasmäärien mittaaminen mahdollistaa talvien ankaruuden keskinäisen vertailun ja mahdollistaa tilastolliset tarkastelut tietyin väliajoin toistuvista pakkaskausista. Pakkasmäärän kehittymisen perusteella voidaan maaperä- ja routimisolosuhteet tunnettaessa tehdä laskennallisia arvioita routaantumisen etenemisestä ja ennustaa routimishaittojen esiintymistä. Tienpidon alalta tiedetään kokemusperäisesti, että routaantumisajalla on merkittävä vaikutus routimisesta aiheutuvien haittojen määrään. Tätä voidaan selittää sillä, että hidas routaantuminen antaa vedelle enemmän aikaa virrata jäätyvään kerrokseen ja mahdollistaa jäälinssien kasvun suuremmaksi kuin nopeasti etenevän routaantumisen yhteydessä. (Ryynänen et al. 2004.)

2.4 Routaantumisen vaikutukset maan mekaanisiin ominaisuuksiin

2.4.1 Jäätymisen aiheuttamat muutokset kitkamaalajeissa

Routaantuminen vaikuttaa merkittävästi vettä sisältävän maan ominaisuuksiin, mikä muuttaa huomattavasti maan mekaanista käyttäytymistä. Yleisesti tiedetään maan lujuuden ja muodonmuutosominaisuuksien paranevan siten, että jäätyneessä maarakenteessa muodonmuutokset liikennekuormituksen johdosta ovat merkityksettömän pieniä täysin sulaan ja kuivaan tilanteeseen nähden. Jäätyneen maan käyttäytyminen erilaisten kuormitusten alaisuudessa on kuitenkin hyvin monimutkaisesti mallinnettavissa, koska jään, veden ja maa-ainespattikkelien mekaanisten ominaisuuksien lisäksi pitää pystyä huomioimaan niiden välinen vuorovaikutus.

Maapartikkelit ja nestemäinen sekä jäätynyt vesi muodostavat termodynaamisen systeemin, joka hakeutuu jatkuvasti uuteen tasapainotilaan ulkoisten tekijöiden kuten paineen ja lämpötilan muuttuessa. Lämpötilan laskiessa jäätyneen veden määrä kasvaa, mikä johtaa maassa vallitsevan jännitystilän kasvuun. Tästä johtuva jäykkyyden muutos kasvattaa myös maan elastisen moduulin arvoa, joka on kuitenkin voimakkaasti riippuvainen ulkopuolisen kuormituksen suuruudesta ja kestosta. Syy tälle on voitu johtaa kuormituksen aiheuttamien suurien rakeiden välisten kontaktipaineiden syntymisestä ja paineen aiheuttamasta jään sulamisesta. Jään sulamiseksi kuormituksen tulee kestää vakio- $h^{\circ}C$ tilassa riittävän pitkään, joten hetkellisessä kuormituksessa ilmiö jää merkityksettömäksi. (Tsytoich 1975.)

Tietyn maalajin muodonmuutosominaisuuksia tutkittaessa kokeesta saatavien parametrien arvoihin vaikuttavat merkittävästi kokeen tyyppi ja käytetty lämpötila. Sekä kuivalle että jäätyneelle näytteelle koesellissä määritettävät muodonmuutosominaisuudet riippuvat vallitsevasta sellipaineesta. Myös jäätyneellä maalla voidaan havaita välittömät ja ajasta riippuvat muodonmuutokset, joissa kummassakin on palautuva ja palautumaton osa. (Andersland & Ladanyi 2004.)

Jäätyneellä maalla voidaan havaita pitkäkestoisessa kuormituksessa aikariippuvaista virumaa. Varsinaisen lujuuden määrittäminen aksiaalisia muodonmuutoksia vastaan on näin ollen jäätyneelle maalle hankalaa, koska murtumiskäyttäytyminen voi olla hauras tai plastinen riippuen maalajin raekokojakaumasta. Lähes puhtaasti plastisesti käyttäytyville jäätyneille maille varsinaisen murtopisteen määrittäminen on mahdotonta ja lujuustarkastelu täytyykin tehdä määrittämällä myötöpiste jännitys-venymäkuvaajasta. (Tsytoovich 1975.) Tiiviissä ja karkearakeisissa maalajeissa, joissa jäätyneen veden määrä on pieni, ei esiinny erillistä virumisvaihetta vaan selkeä murtuminen, jota edeltää jään halkeilu. (Williams 1989.)

Vakiojännityksellä tehtävässä muodonmuutuskokeessa voidaan jäätyneillä hiekoilla ja sitä hienommilla maalajeilla havaita kolmentyyppistä virumaa. Ensimmäisessä vaiheessa virumanopeus hidastuu äkkiä kuormituksen aloittamisen jälkeen ja toisessa vaiheessa pysyy vakiona. Kolmannessa vaiheessa virumanopeus kiihtyy äkillisesti ja näin ollen on mahdollista määrittää myötölujuus kyseiselle maalajille. Paljon jäätä sisältävistä hiekoista ja silteistä on mahdollista havaita nämä kaikki virumavaiheet kuormitustason ollessa korkea. Matalammilla kuormitustasoilla kolmas vaihe saattaa jäädä kokonaan pois viruman jatkuessa vakionopeudella. Hyvin matalilla kuormituksilla viruma lähestyy jotain tiettyä arvoa asymptoottisesti muuttuen hyvin vähän ajan kuluessa. (Andersland & Ladanyi 2004.)

Maan ja jään yhteistoiminnassa on huomattavaa se, että normaaleissa paine- ja lämpötilaolosuhteissa jäämatriisin jäykkyys on maa-ainesta huomattavasti suurempi. Tämän takia jää saavuttaa maksimi-lujuutensa huomattavasti pienemmillä muodonmuutustasoilla kuin raerunko. Matalalla sellipainetasolla voidaan esimerkiksi tiiviistä hiekasta leikkauskokeessa määrittää kaksi myötöpistettä; toinen noin 1 prosentin ja toinen noin 10 prosentin venymätasolla. Jälkimmäisen myötöpisteen kohdalla raerungon sisäinen kitka alkaa vaikuttaa ja sen antama lujuus on nähtävissä jännitys-venymäkuvaajasta. Kolmiakksiaalikoelaitteistolla tehdyissä lujuuskokeissa leikkauslujuuskuvaajasta tulee polveilevan muotoinen esitettäessä se normaalijännityksestä riippuvana. Tämä johtuu paineen kasvun aiheuttamasta jään sulamisesta, jolloin maamateriaalin ja jään yhteistoiminta muuttuu merkittävästi kokeen aikana. Tällöin lujuus tulee aluksi maan ja jään yhteistoiminnasta, mutta heikkenee jään sulaessa ja alkaa taas kasvaa raerungon ottaessa kuormituksen täysimääräisesti kannettavakseen. (Andersland & Ladanyi 2004.)

2.4.2 Jäätymisen aiheuttamat muutokset savessa

Jäätymisestä johtuvia muutoksia hienorakeisissa maalajeissa, erityisesti savessa, on tutkittu verrattain paljon. Savissa on havaittu tapahtuvan jäätymis-sulamissykliin johdosta konsolidoitumista ja merkittäviä muutoksia vedenläpäisevyydessä. Jäätymisen yhteydessä tapahtuvaa konsolidoitumista on osoitettu johtuvan suljetussa tilassa tapahtuvista tehokkaiden jännitysten muutoksista. Terzaghin esittämän periaatteen mukaan tehokas jännitys riippuu vallitsevasta in-situ jännityksestä σ ja huokosvedenpaineesta u_w kaavan 2-2 mukaisesti (Chamberlain 1989).

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (2-2)$$

Suljetussa tilassa tapahtuvan jäätymisen yhteydessä muodostuvan jäälinssin ympärille kulkeutuu vettä viereisistä huokostiloista, koska maan heikon vedenläpäisevyyden johdosta imupaine ei riitä nostamaan vettä syvemmältä vapaan veden pinnasta. Tällöin huokosvedenpaine u_w saa kaavassa 2-1 negatiivisen arvon eli kasvavaa jäälinssiä ympäröiviin huokostiloihin muodostuu alipaine. Näin ollen tehokas jännitys saa paikallisesti jäälinssiä ympäröivissä tiloissa alkuperäistä suuremman arvon ja maa konsolidoituu uutta tehokasta jännitystilaa σ' vastaavaan tiiviyteen. Myös paisuvien jäälinssien on havaittu aiheuttavan ympäröivien maapartikkelien tiivistymistä. (Chamberlain 1989.)

Jotta saven käyttäytymistä jäätymisen yhteydessä pystytään ymmärtämään paremmin, tulee tarkastella myös mikrotason muutoksia saven raerungossa. Huokostiloihin veden poistumisen johdosta muodostuvan alipaineen lisäksi jäätymisen aiheuttaa muitakin muutoksia. Mikrokokoisten huokosten sisällä olevat jäälinssit pyrkivät kasvaessaan erottamaan toisistaan kiinni olevia savipartikkeleita, mikä johtaa jäälinssien viereisillä alueilla uusien makrokokoisten rakeiden syntymiseen. Tällöin saven rakenteeseen pääsee muodostumaan myös halkeamaverkkoja, jotka jäätymisen edetessä täyttyvät jäällä. Prosessin tuloksena syntyvien makrokokoisten rakeiden muodostuminen riippuu monesta tekijästä kuten savipartikkelien mineraalisesta koostumuksesta, alkuperäisestä partikkelien järjestymisestä, jäätymisnopeudesta ja matalimmasta esiintyvistä lämpötilasta. Jäätymisen aikaisten muutosten on havaittu parantavan vedenläpäisevyyttä sekä jäätymisen etenemissuunnassa että kohtisuoraan sitä vastaan. Sulavien jäälinssien jättämät tyhjätilat ja saven rakenteeseen syntyneiden kutistumishalkeamien muodostamat kanavat antavat vedelle täysin uusia virtausreittejä. Vedenläpäisevyyden kasvun on havaittu voimakkaasti riippuvan saven alkuperäisestä juoksurajasta siten, että pienen juoksurajan omaavat materiaalit kasvattavat eniten vedenläpäisevyyttään. Tämän on päätelty johtuvan siitä, että suuren juoksurajan omaaviin materiaaleihin muodostuu vähemmän makrokokoisia huokostiloja. Kohtalaisesti plastisille saviille on havaittu noin kolmen kertaosan kasvu vedenläpäisevyydessä, kun jäädytys-sulatuskoe on tehty lähellä plastisuusrajaa olevalla vesipitoisuudella. (Chamberlain 1989.)

3 PAINUMINEN JA SULAMISEN AIHEUTTAMAT MUUTOKSET

Sulamispehmenemisellä tarkoitetaan keväällä tapahtuvaa luonnontilaisten ja rakennettujen maakerrosten kantavuus- ja muodonmuutosominaisuuksien muuttumista roudan sulamisen takia. Sulamisen aikana maan huokostila on usein täysin kyllästynyt vedellä ja sen huokostilavuus on kasvanut ainakin paikallisesti routimisilmiössä tapahtuvan jäälinssin muodostuksen takia. Kasvanut vesipitoisuus aiheuttaa lujuusominaisuuksien heikentymisen, mikä johtaa sulanutta rakennetta kuormitettaessa suurempiin muodonmuutoksiin kuin vastaavalla kuormitustasolla täysin tai osittain kuivassa rakenteessa. Koheesiomaat kykenevät pidättämään suuren ominaispinta-alansa takia paljon kosteutta karkearakeisiin maalajeihin nähden ja kuivuminen on niissä hitaampaa heikomman vedenläpäisevyyden takia. Tämän takia koheesiomaalajit ovat merkittävästi kitkamaalajeja alttiimpia lujuskadolle sulamisen yhteydessä.

3.1 Painumalajit

Geotekniikassa maapohjaan aiheutuvat painumat jaotellaan niiden syntymekanismien perusteella välittömään, konsolidaatio-, sekundääri- ja leikkausvoimista johtuvaan painumaan. Kunkin painumalajin syntymisen riskin tunnistaminen kuuluu osana radan geotekniseen suunnitteluun.

Välittömästi tapahtuvassa painumassa maarakeet järjestyvät uuteen tiiviimpään tilaan tarkasteltavaa kerrosta kuormitettaessa. Koheesiomaihin nähden suuren vedenläpäisevyyden omaavissa kitkamaakerroksissa vesi poistuu kuormitettaessa nopeasti ja maarakeet pääsevät järjestymään uutta kuormitusta vastaavaan tilaan suhteellisen nopeasti; yleensä tuntien tai päivien kuluessa. (Cernica 1995.)

Välittömän painuman määrittämiseen voidaan käyttää elastista moduulia, joka voidaan selvittää esimerkiksi suljetun tilan esikonsolidoidulla kolmiakselialikokeella (Craig 2001). Tällöin moduuli saadaan jännitys-venymä-kuvaajasta alkuperäisen kuormitus syklin tangenttimoduulina. Ongelmaksi painuman laskemisessa tulee Poissonin luvun määrittäminen, mikä voi vaihdella paljon eri maalajien välillä. (Cernica 1995.) Suunnittelussa elastisten painumien arvioimiseen käytetään usein kokemusperäistä tietoa tai in-situ havaintoja elastisuusteorioiden säätämiseksi vastaamaan todellisuutta. Yleensä suunnittelun kohteena oleville maamassoille on ominaista suuri laajuus ja heterogeenisuus, joten edustavien moduuliarvojen määrittäminen on suhteellisen

hankalaa. Tämän takia moduulien arviointi tehdään usein näytteiden rakeisuuden perusteella kolmiaksiaalikokeiden sijaan. Yleisin käyttökohde elastiselle moduulille on laadunvarmistusvaiheen yhteydessä, kun levykuormituskokeella osoitetaan suunnittelussa määritetyn tavoitekantavuusvaatimuksen täyttyminen rakennekerrokselle tai koko rakenteelle.

Primäärisessä konsolidaatiopainumassa on kyse täysin vedellä kyllästetyn koheesiomaan kokoonpuristumisesta sitä kuormitettaessa. Alhaisen vedenläpäisevyyden omaavassa maassa kuormituksen kasvattaminen siirtyy aluksi lisäkuormaksi huokosvedelle ja aiheuttaa näin olleen ylipaineen kuormittamattomassa tilassa vallitsevaan hydrostaattiseen paineeseen nähden. Huokosveden ylipaineen purkautuessa maakerros puristuu kasaan lisäkuorman siirtyessä raerungon kannettavaksi ja maakerroksen kokonaistilavuus pienenee. Konsolidaation nopeus riippuu voimakkaasti maan vedenläpäisevyydestä eri suunnissa ja siitä pääseekö vesi purkautumaan sekä ylä- että alapuolelle kerrosta. (Cernica 1995.) Primäärinen konsolidaation katsotaan tapahtuneen siinä vaiheessa, kun huokosveden ylipaine on päässyt kokonaan purkautumaan.

Maakerroksen konsolidoituminen on kolmiulotteinen ongelma, jonka matemaattisen ratkaisemisen tekee vaikeaksi maan ominaisuuksien poikkeaminen eri suunnissa eli anisotrooppisuus. Terzaghin yksiulotteinen konsolidaatioteoria tarjoaa käyttökelpoisen työkalun konsolidaatiopainumien laskemiseen, vaikka lähtöoletukset yksinkertaistavat huomattavasti todellista tilannetta. Maan kokoonpuristumisen laskemiseksi ödometrikokeen tuloksista määritetään vedenläpäisevyydestä, huokosluvusta ja kokoonpuristuvuudesta riippuva konsolidaatiokerroin. (Cernica 1995.) Usein ollaan kiinnostuneita myös konsolidoitumisen nopeudesta, koska painumien kehittämisellä on suuri merkitys esimerkiksi rakentamisen kannalta. Tätä varten voidaan määrittää konsolidaatiokertoimesta, tarkasteltavan kerroksen paksuudesta ja kuormituksen kestosta riippuva aikatekijä, jonka avulla saadaan laskettua konsolidaatioaste eri syvyyksillä.

Sekundääripainumalla tai hiipumalla tarkoitetaan primäärinen konsolidaation jälkeen tapahtuvaa hidasta painumaa. Savilla tämä painumalaji voi johtua kolloidikemiallisista prosesseista, joiden johdosta raerunko hiipuu pitkällä aikavälillä, mutta painuma ei muodostu merkittäväksi primääriseen konsolidaatioon nähden. Eloperäisillä maalajeilla, kuten turpeella ja liejulla, sekundääripainuma voi taas muodostua erittäin merkittäväksikin painumalajiksi. (Cernica 1995.) Tämä painumalaji ei kuitenkaan kehitymisnopeutensa ja syntymekanisminsa takia tule merkittäväksi tarkasteltaessa kausittaisen jäätymis-sulamissyklin johdosta tapahtuvia muodonmuutoksia.

Konsolidoitumisen lisäksi leikkausjännityksistä johtuvat painumat voivat muodostua merkittäväksi plastisilla savilla kokonaisvarmuuden ollessa vähemmän kuin 1,4 murtoyhtä vastaan. Nämä painumat ilmenevät vaakasuuntaisina siirtyminä kuormituksen alla konsolidaatiopainuman kanssa samanaikaisesti. (Leroueil 1990.) Sivuttaissiirty-

miä voidaan määrittää empiiristen menetelmien avulla, mutta esimerkiksi Liikenneviraston ohjeistuksessa FEM-laskenta on tarkkuuteensa takia ensisijainen menetelmä näiden muodonmuutosten määrittämiseen (Tiepenkerein ja leikkausten suunnittelu 2010).

3.2 Sulamisen eteneminen rakenteessa

Luvussa 2.5 todettiin maan, jään ja sulana pysyvän veden muodostavan matriisin, joka hakeutuu jatkuvasti uuteen tasapainotilaan ulkoisten olosuhteiden muuttuessa. Keväällä sulaminen alkaa ilmanlämpötilan noustessa 0 °C:n yläpuolelle. Sulaminen tapahtuu 70-80 prosenttisesti ylhäältä päin, mutta lämpövirran suunnan muuttuessa sulamiskauden alkaessa alkaa jäätynyt kerros sulaa myös alapuolelta maasta virtaavaan lämmön vaikutuksesta (Ehrola 1996).

Lämmön siirtymisen kolme päätapaa ovat säteily, johtuminen (konduktio) ja kulkeutuminen virtaavan aineen mukana (konvektio). Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan lämpötilaerot pyrkivät aina tasoittumaan, joten jäätymisen ja sulamisen kannalta lämmön siirtymistavat toimivat yhtälailla molempiin suuntiin. Sulamisessa määrääväksi muodostuva lämmönsiirtymistapa määräytyy maarakenteen muodon ja materiaalin ominaisuuksien mukaan. Kokonaislämpövirta koostuu kuitenkin lähes aina kaikkien siirtymistapojen summana.

Radan ja muiden liikenneväylien kasvillisuudesta sekä lumesta ympärivuotisesti puhtaana pidettävä pinta on lämmöneristävyydeltään huomattavasti heikompi kuin luonnontilaisilla alueilla. Tällä on suuri vaikutus lämmön siirtymiseen johtumalla maasta ilmaan, koska lumen lämmönjohtavuus on paljaaseen maahan verrattuna hyvin pieni (Williams & Smith 1989). Maamateriaalin lämmönjohtavuuden kannalta määräävät tekijä ovat kuivairtitiheys ja vesipitoisuus siten, että molempien edellä mainittujen kasvaessa lämmönjohtavuus kasvaa. Jään suuremmasta lämmönjohtavuudesta johtuen jäässä olevan maan lämmönjohtavuus on sulanutta suurempi. (Phukan 1985.) Myös maarakeiden mineraloginen koostumus voi vaikuttaa lämmönjohtavuuteen suuresti, koska esimerkiksi kvartsin lämmönjohtavuus on jäähän verrattuna noin nelinkertainen (Williams & Smith 1989).

Erilaisten pintojen ominaisuudet eroavat suuresti myös kyvyssä absorboida auringosta tulevaa lyhytaaltoista lämpösäteilyä. Märän päällysteen tai kiviaineksesta koostuvan pinnan absorbointikyky voi olla 2–4-kertainen verrattuna lumeen, joka heijastaa suurimman osan säteilystä takaisin. Maasta myös poistuu lämpöä pitkäaaltoisena säteilynä, josta osa myös heijastuu pilviverhosta takaisin maahan. Lähtevän säteilyn määrä riippuu maan pintalämpötilasta ja ilman lämpötilasta sekä ilman vesihöyryn osapaineesta. (Andersland & Ladanyi 2004.)

Lämmön virtaaminen maan ja ilman välillä riippuu useista eri tekijöistä kuten lämpötilaerosta, tuulen nopeudesta ja paikallisista pinnanmuotojen aiheuttamista turbulensseista. Täysin tyynissä olosuhteissa maan ollessa ilmaa kylmempää lämpöä siirtyy maahan vain konduktiivisesti, koska ilmamassan eri tiheyksiset osat ovat tasapainossa raskaimpien ollessa lähellä maanpintaa. Maan lämmitessä päivän aikana saattaa pinnan lämpötila nousta sen yläpuolista ilmamassaa lämpimämmäksi, mikä aiheuttaa lämpötilaeron kasvaessa riittävän suureksi konvektiivisen virtauksen. Tällöin lämpöä alkaa siirtyä virtaavan ilmamassan mukana maasta pois päin maata jäähdyttäen. (Andersland & Ladanyi 2004.)

Ratarakenteita tarkasteltaessa karkearakeisten murskattujen materiaalien avoin huokostila aiheuttaa sen, että johtumisen ohella konvektio saattaa muodostua määrääväksi lämmönsiirtymistavaksi (Nurmikolu 2004). Vanhoilla radoilla alusrakenteen materiaalit ovat pääsääntöisesti luonnon soraa ja hiekkaa, joiden lämmön eristävyys on keskimäärin parempi ja huokostilat pienempiä kuin murskatuilla kiviaineksilla. Vanhojen ratapenkereiden poikkileikkausten geometria on usein latistunut tai varsinainen pengermuoto voi olla lähes sulautunut ympäröivään maastoon. Näissä luonnonmateriaaleista tehdyissä rakenteissa lämmön pääasiallinen siirtymistapa on johtuminen (Nurmikolu 2004).

Pakotetulla konvektiolla tarkoitetaan sellaista virtaavan aineen mukana tapahtuvaa lämmönsiirtymistä, jossa ulkopuolinen voima aiheuttaa virtauksen toisin kuin edellä esitetyssä lämpötilaeroista johtuvassa luontaisessa konvektiossa. Ilman mukana tapahtuvan siirtymisen voi aiheuttaa tuuli, joka pääsee suhteellisen vapaasti puhaltamaan raerungoiltaan avoimiin pengerrakenteisiin. Toinen mekanismi on lämmön kulkeutuminen sulamis- ja sadevesien mukana rakenteeseen, mikä etenkin keväisin voi huomattavasti nopeuttaa suuren huokostilan omaavan penkereen sulamista tiiviimpään nähden. (Nurmikolu 2004.)

Edellä esitetyistä tekijöistä johtuen sulaminen lähtee keväällä ensimmäiseksi eteneään tukikerroksen lumesta paljaana olevilta alueilta. Karkearakeisilla kerroksilla, joiden kapillaarinen nousukorkeus on erittäin pieni tai nolla, pääasiallinen veden poistumistie on painovoiman johdosta tapahtuva virtaaminen raerungon läpi kuivatusrakenteisiin. Keväällä vallitsee kuitenkin joitain viikkoja tilanne, jolloin sulavan kerroksen alapuolella on vielä jäässä oleva maakerros ja penkereen sivuosat pysyvät jäätyneinä lumipeitteen takia. Tällöin karkearakeisissa maissa vesi pääsee poistumaan ainoastaan haihtumalla. Korkea ilmankosteus voi edesauttaa rakenteen kuivumista syvemmältä, koska rakenteen yläosan pysyessä märkänä säilyy kapillaarinen yhteys rakenteen pinnalle ja veden on mahdollista virrata pois maasta tätä kautta. Mikäli kapillaarinen yhteys pintaan katkeaa, voi kuivuminen kestää pidempään (Angen, E. 1978, Simonsenin ja Isacssonin 1999 mukaan). Suuresta ilmankosteudesta johtuen vedellä ei kuitenkaan olisi mahdollisuutta haihtua, vaan ainut poistumistie olisi pintavaluntana.

Sulamisen etenemiseen vaikuttavien muuttujien lukumäärä ja paikallisuus tekevät tarkasta mallintamisesta äärimmäisen vaikeaa. Maakerrosten mekaanisen toiminnan arvioimiseksi sulamisen yhteydessä on kuitenkin oleellista tietää ainakin tyydyttävällä tarkkuudella roudan sulamisen etenemistaso ja nopeus. Erityisesti huokosvedenpainneiden kehittymisen arviointi sulamisen aikana edellyttää tätä.

Nixon ja McRoberts (1973) ovat esittäneet kaavan 3-1 mukaisen Stefanin yhtälöön perustuvan ratkaisun sulamisrintaman etenemiselle

$$X = \alpha\sqrt{t} \quad (3-1)$$

jossa X on sulamissyvyys metreissä, α on vakio ja t aika sekunneissa. Yhtälön reuna-ehtoina ovat todellisuudesta poiketen, että ominaisuudet sekä sulaneessa että jäätyneessä vyöhykkeessä ovat homogeenisia ja lämpötilasta riippumattomia. Ratkaisu perustuu havaintoon, että sulamisrintaman etenemissyvyys ajan neliöjuuren suhteen määräytyy seitsemän muuttujan perusteella. Nämä tekijät ovat sulan ja jäätyneen maan lämmönjohtavuudet, tilavuuslämpökapasiteetit, pinnan ja maakerroksen lämpötilat sekä latenttilämpö. Jos jäätyneen maan lämpötilajakauman ei oleteta vaikuttavan sulamisasteeseen, voidaan vakiolle α esittää ratkaisu hyvällä tarkkuudella kaavan 3-2 mukaisesti

$$\alpha = 2\sqrt{\alpha_u}\left(\frac{Ste}{2}\right)^{\frac{1}{2}}\left(1 - \frac{Ste}{8}\right) \quad (3-2)$$

jossa α_u on sulan maan lämmön tasoittumiskerroin

$$\alpha_u = \frac{k_u}{c_{vu}} \quad (3-3)$$

jossa c_{vu} on sulan tilan tilavuuslämpökapasiteetti ja k_u lämmönjohtavuus. Kaavassa 3-2 Ste on Stefanin luku

$$Ste = \frac{c_{vu}T_s}{L} \quad (3-4)$$

jossa T_s vakiolämpötila pinnalla ja L latenttilämpö tilavuusyksikköä kohden. (Andersland & Ladanyi 2004.)

Edellä esitetyn menetelmän hyödyntämistä laajasti roudan sulamisen arviointiin kentällä rajoittaa tarvittavien parametrien suuri määrä, koska niiden määrittäminen edellyttää paljon näytteenottoa ja laboratoriotutkimuksia. Vaikka materiaaliominaisuuksia, kuten lämmönjohtavuutta ja tilavuuslämpökapasiteetteja, on mahdollista määrittää

yleisesti eri maalajeille, poikkeavat lämpötilat maanpinnalla ja maahan absorboituvan lämpösäteilyn määrä huomattavasti maastossa eri paikkojen välillä pinnanmuodoista ja kasvillisuuden peitteisyydestä

Suomessa on kehitetty empiirisiä laskentakaavoja sulamisen etenemisen määrittämiseen sorateiden keliikkorajoitusten määrittämistarkoituksessa. Näiden kaavojen toimivuutta on testattu vertaamalla niitä maastossa mitattuihin sulamisnopeuksiin. Keli-rikon vaikeus ja painorajoitukset –raportissa (Ryynänen et al. 2004) on todettu näillä menetelmillä päästävän noin yhden tai kahden viikon tarkkuuteen menetelmästä riippuen. Tätä voidaan kuitenkin pitää korkeintaan välttävänä tarkkuutena huomioiden, että eteläisessä Suomessa roudan täydellinen sulaminen kestää yleensä noin 1,5–2 kuukautta. Raportissa todetaankin tarkemman mallin muodostamisen edellyttävän sulamisen etenemisen seuraamista vaihtelevissa olosuhteissa ja sulamiseen liittyvien muuttujien seuranta.

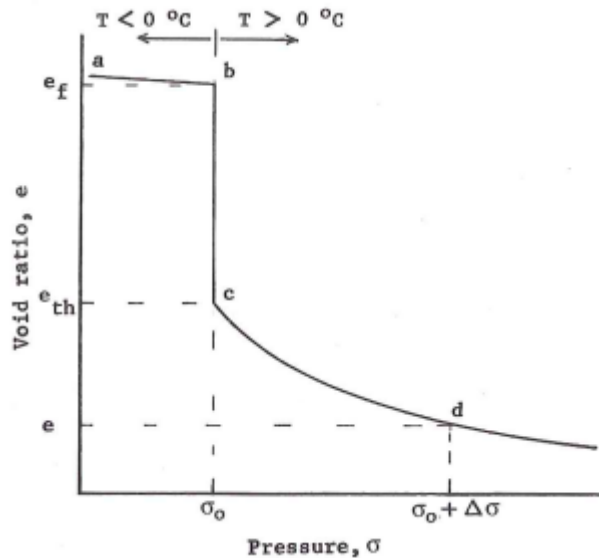
3.3 Sulamisen vaikutus koheesiomaalajien mekaani- seen toimintaan

3.3.1 Sulamiskonsolidaatio

Jäätymis-sulamissyklin kokevaan savi- tai silttikerrokseen on todettu aiheutuvan luvussa 2.4.2 esitetyn vakio-tilavuudessa tapahtuvan jäätymiskonsolidaation lisäksi sulamisvaiheen konsolidoitumista. Jäälinsien sulaessa maakerros hakeutuu takaisin vallitsevaa in-situ jännitystä vastaavaan tiiviyyteen. Jään segregaatian aiheuttaman tilavuuden kasvun palautumisen lisäksi sulavaan maakerrokseen voi aiheutua tilavuuden muutosta riippuen siitä, kuinka suuria muutoksia edeltävä jäätymisen on maakerrokseen aiheuttanut. (Andersland & Ladanyi 2004.) Tsytovin (1975) mukaan jään tilavuusosuuden ollessa suuri ($i_{vol} \geq 0,5$) jäätyneen maan tilavuudesta tulee suotovirtaukseen perustuvan konsolidaatioteorian käyttö kyseeseen, ja matalilla jääpitoisuuksilla ($i_{vol} \leq 0,25$) tulisi soveltaa virumiseen perustuvia teorioita painuman määrittämiseen. Matalia jääpitoisuuksia esiintyy hyvin vettäläpäisevissä kitkamaalajeissa eli maala-jeissa, jotka eivät ole routimisherkkiä. Kitkamaalajien sulamisen aikaista painumiskäyttäytymistä on käsitelty luvussa 3.4.

Tyypillinen sulamispainumakokeesta saatava tulos huokosluvun muuttumisesta jännityksen funktiona on esitetty kuvassa 3.1. Kokeessa routineen ja suuren jääpitoisuuden omaavan näytteen annetaan sulaa ödometrissä valitun alkujännityksen alaisuudessa, jonka jälkeen se kuormitetaan haluttuun jännitystilaan asti. Jännitystilojen valinnalla voidaan simuloida in-situ tilannetta, jonka painumakäyttäytymisestä halutaan tietoa. Aluksi muutos huokosluvussa on hyvin pieni sulamispistettä b lähestyttäessä, mutta heti sen jälkeen huokosluku tippuu äkillisesti pisteeseen c jäälinsien sulettua. Näytettä edelleen kuormitettaessa lisäkuormalla $\Delta\sigma$, konsolidoituminen jatkuu osittain yli-

konsolidoituneen alueen jännityspolkua pitkin pisteeseen d. Tämä johtuu jäätyksen aiheuttamista muutoksista saven mikro- ja makrotason rakenteessa, jolloin rakenne on osittain konsolidoitunut jäätyispainetta vastaavaan tilaan.



Kuva 3.1. Periaatteellinen sulamispainumakokeen huokosluku-jännityskuvaaja (Andersland & Ladanyi 2004).

Sulamisen etenemistä maassa voidaan mallintaa homogeenisena puoliavaruutena, jossa 0 °C:n isotermi eli sulamisrintama etenee jäätyneessä maassa alaspäin. Mallin reunaehdot painuman määrittämiseksi konsolidaatioteorian avulla ovat, että jäässä oleva maa ei deformeudu eikä siirrä huokosvedenpainetta eteenpäin. Sulaneeseen raerunkoon voidaan tällöin soveltaa Terzaghin konsolidaatioteoriaa siten, että kuormittavina tekijöinä ovat omapaino tai omanpainon ja ulkoisen kuorman yhdistelmä. Sulamisrintamalla vapautunut vesi pyrkii virtaamaan ylöspäin, mikäli huokosveden ylipainetta esiintyy. Tällöin kaiken poistuvan veden täytyy aiheuttaa maassa tilavuudenmuutosta. Kokoonpuristuma voidaan esittää kaavan 3-5 muodossa

$$\frac{\Delta V}{V} = -m_v \Delta \sigma' \quad (3-5)$$

jossa $-m_v$ on maan kokoonpuristuvuuskerroin ja $\Delta \sigma'$ tehokkaan jännityksen muutos sulamisrintaman tasalla. (Andersland & Ladanyi 2004.) Tehokkaan jännityksen muuttuminen riippuu ulkopuolisen kuorman vaihtelusta ja huokosvedenpaineen kehittymisestä sulamisrintaman edetessä. Ongelmaksi muodostuu kulloisenkin huokosveden ylipaineen määrittäminen ja sitä kautta tehokkaiden jännitysten selvittäminen. Kokoonpuristuvuuskerroin on maalajikohtainen ominaisuus, joka voi muuttua jäätyksen aiheuttamien muutosten takia.

Tehokas jännitys sulavassa maakerroksessa voidaan kirjoittaa kaavan 3-6 muotoon oletuksella, että alkuperäinen tehokas jännitys runsaasti jäätä sisältävässä maassa on likipitään nolla

$$\Delta\sigma' = P_0 + \gamma'X - u(X, t) \quad (3-6)$$

jossa P_0 pinnalle kohdistuva kuormitus, γ' sulaneen maan tehokas tilavuuspaino, X sulamissyvyys ja u huokosvedenpaine sulamissyvyyden sekä ajan funktiona.

Terzaghin konsolidaatioteorian mukaan huokosylipaineen muutosnopeus $\partial u/\partial t$ riippuu maan konsolidaatiokertoimesta c_v ja hydraulisen gradientin muutosnopeuden muuttumisen nopeudesta $\partial^2 u/\partial z^2$ kaavan 3-7 mukaisesti (Cernica 1995)

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} . \quad (3-7)$$

Alun perin Morgenstern ja Nixon (1971) esittivät kaavan 3-8 mukaisen virhefunktioon perustuvan analyttisen menetelmän huokosvedenpaineen ratkaisemiseksi edellä esitetylle homogeenisen puoliavaruuden tapaukselle, jossa sulavaa maakerrosta kuormittaa joko omapaino tai pelkästään pinnalle kohdistuva kuorma P_0 . Matemaattinen ratkaisu on molemmille tapauksille sama, mutta ratkaisujen toisistaan poikkeavien reunaehtojen takia tarkastelu pitää tehdä erikseen (Ladanyi & Shen 1989).

$$u(x, t) = \frac{P_0}{\operatorname{erf}(R) + \frac{e^{-R^2}}{\sqrt{\pi}R}} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{c_v t}}\right) + \frac{\gamma'x}{1 + \frac{1}{2R^2}} \quad (3-8)$$

jossa

$$R = \frac{X}{2\sqrt{c_v t}} = \frac{\alpha}{2\sqrt{c_v}} . \quad (3-9)$$

Tässä R on sulamiskonsolidaatiosuhde, joka ilmaisee sulamisesta syntyvän huokosveden syntymisnopeuden suhdetta maan kykyyn purkaa vettä tietyllä hetkellä vallitsevasta sulamissyvyydestä. Kertoimen α riippuvuus ja siihen vaikuttavat seikat on esitetty luvussa 3.2. Pieni parametrin R arvo ilmentää kerroksen nopeaa konsolidoitumista, kun arvoilla $R \geq 1$ koko sulamisrintaman yläpuolinen kuorma on huokosveden kannettavana. Tällöin tehokas jännitys lähestyy nollaa. (Ladanyi & Shen 1989.)

Tarkasteltaessa tilannetta, jossa ulkopuolinen lisäkuorma ei kuormita sulavaa maakerrosta eli $P_0=0$, tulee kaavan 3-8 ensimmäinen tekijä nolllaksi. Nyt voidaan ottaa käyttöön vakio B

$$B = \frac{1}{1 + \frac{1}{2R^2}} \quad (3-10)$$

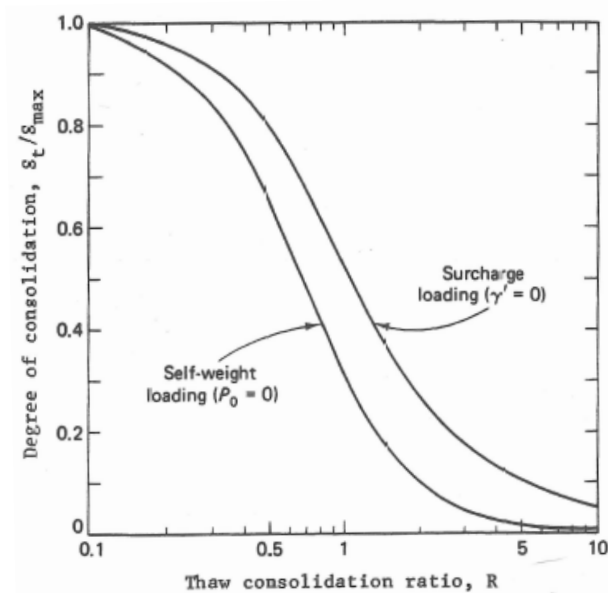
ja yksikötön syvyysmuuttuja Z

$$Z = \frac{x}{X(t)} \quad (3-11)$$

jossa $X(t)$ sulaneen kerroksen paksuus ajanhetkellä t ja x tarkastelusyvyys sulaneessa kerroksessa. Muuttuja Z kuvaa tarkasteltavan syvyyden suhteellista osuutta koko sulaneesta kerroksesta ajanhetkellä t . Nyt voidaan ulkoisen paineen P_0 saadessa arvon 0 kaava 3-8 lausua muodossa

$$\frac{u(Z, t)}{\gamma'X} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2R^2}} = B. \quad (3-12)$$

Kaavan 3-12 mukaan tarkastelusyvyydellä vallitsevan huokosveden ylipaineen ja yläpuolisen maakerroksen painon suhde on vakio. On syytä huomata, että R on ajasta riippumaton, mutta muuttuu sulamissyvyyden funktiona. Sulaneen kerroksen kokonaispaksuus tiedettäessä voidaan R :n avulla määrittää sulamistason konsolidaatioaste kyseisellä hetkellä. R :n arvon kasvaessa vakion B arvo kasvaa, jolloin maanpaineon $\gamma'X$ ollessa vakio kaavassa 3-12 huokosvedenpaine saa suurempia arvoja. Jos sulamishetkeen mennessä toteutuneet painumat tunnetaan, auttaa tämä hahmottamaan vielä odotettavissa olevien painumien suuruusluokkaa. Kuvassa 3.2 on esitetty konsolidaatioasteen vaihtelu eri R :n arvoilla, sulavaa kerrosta kuormittaa pelkästään pintakuorma P_0 tai yläpuolisen maan paino.



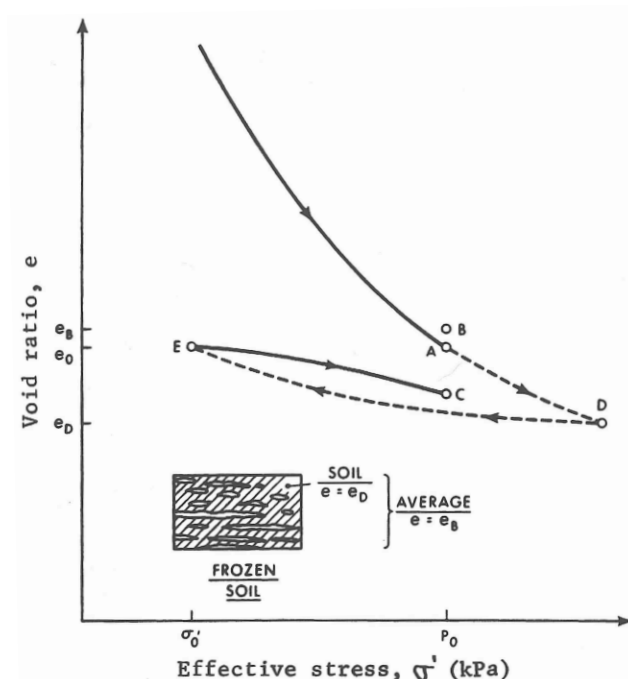
Kuva 3.2. Konsolidaatioasteen muutos sulamiskonsolidaatiosuhteen R vaihteluun nähden (Andersland & Ladanyi 2004).

Sulamisen loputtua ajanhetkellä t kokonaispainuma S_{max} voidaan laskea maan koonpuristuvuusmoduulin m_v ja tehokkaiden jännitysten muutoksen avulla kaavan 3-13 mukaisesti

$$S_{max} = m_v \left(P_0 X + \frac{\gamma' X^2}{2} \right) \quad (3-13)$$

Edellä esitettyssä sulamiskonsolidaation laskentatavassa on oletettu, että maassa vallitseva jäännösjännitys on nolla sen sulaessa suljetuissa olosuhteissa. Tämä on relevantti oletus, jos kyseessä on hyvin paljon jäätä sisältävä maa ja jään muodostamat huokostilat ovat suuria sulaneessa tilassa. Mikäli maan jääpitoisuus on vähäinen, voi siihen jäätyksen yhteydessä jäädä ainakin osittain esikuormitusta vastaava jännitystila. (Nixon & Morgenstern 1973.)

Alun perin jäännösjännityksen merkityksen osoittivat Nixon ja Morgenstern (1973) kokeella, jossa näyte konsolidoitiin tunnettuun jännitystilaan P_0 ja huokosylipaineiden poistuttua näyte jäädytettiin suljetussa tilassa. Kuvassa 3.3 on esitetty kokeen periaatteellinen huokosluku-jännityskuvaaja. Piste A edustaa konsolidoitua lähtötilannetta, josta näyte turpoaa routaantuessa huokosluvun arvoon B.



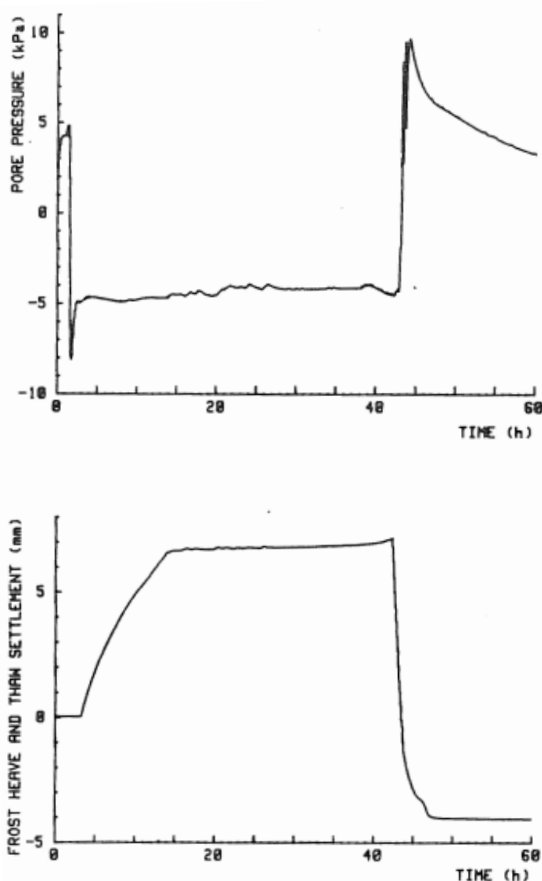
Kuva 3.3. Periaatteellinen suljetun tilan jäädytys-sulatuskokeen jännityspolkukuvaaja (Andersland & Ladanyi 2004).

Näytteen suljetun tilan kokeessa tapahtuva nettotilavuuden muutos pisteestä A pisteeseen C on selitettävissä sillä, että osa näytteestä on konsolidoitunut paisuvien jäälinsien välissä suuremman esikonsolidaatiojännityksen kuin P_0 alaisuudessa huokosluvun arvoon pisteessä D. Sulava näyte pyrkii absorboimaan kaiken sulamisen yhteydessä vapautuvan veden turvoten alkuperäistä jännitystilaa vastaavaan huokoisuuteen e_0 pisteessä E. Tällöin jännitys tippuu jäännösjännityksen σ'_0 tasolle, ja mikäli sulamisvettä on vielä tällöin saatavilla, voi tehokas jännitys tippua nolleen. On siis huomattava, että vain muutokset vallitsevassa jäännösjännityksessä johtavat pysyviin tilavuudenmuutoksiin maassa. Kun näytteen annetaan kuivua vapaasti, muuttuu huokosluku ylikonsolidoituneen maan jännityspolkua EC kuormitusta P_0 vastaavaan tilaan. (Nixon & Morgenstern 1973.)

Kujala ja Laurinen (1989) tutkivat jäädytys-sulatuskokeen vaikutuksia normaalikonso-lidoituneelle lihavalle savelle. Kokeiden suorittamiseen käytettiin jäädyttämiseen so-veltuvaa ödometrilaitteistoa, jolla voitiin saada lämpötilan muutokset portaittaisiksi tai jatkuviksi. Tuloksista kuvassa 3.4 nähdään jäätyksen yhteydessä näytteeseen syntyvä selvä huokosveden alipaine ja sulamisen yhteydessä tapahtuva pudotuksenomainen painuma. Lisäkuorman alaisuudessa tapahtunut sulaminen aiheutti painuman, jossa päädyttiin selvästi lähtötason alapuolelle.

Sulamisen aikana tapahtuvan painuman suuruuteen vaikutti eniten näytteessä vallinnut routimispaine. Ulkoisen kuorman viisinkertaistaminenkaan ei aiheuttanut suurempaa painumaa näytteeseen, jonka routimispaine oli jäänyt verrokinäytettä alhaisemmaksi.

Morgensternin ja Nixonin esittämällä tavalla saatujen laskennallisten huokospaineiden arvojen todettiin vastaavan melko hyvin kokeessa mitattuja. Residuaalijännitysten havaittiin selvästi pienentyneen jään segregaatoin vaikutuksesta, mikä on yhtenevä tulos Morgensternin ja Nixonin esittämien kanssa. Sulamiskonsolidaatiosuhde R havaittiin kokeissa estimaatiksi näytteen stabiiliudelle siten, että R :n keskimääräisellä arvolla 0,542 routunut ja arvolla 0,266 nopeasti kauttaaltaan jäädytetty näyte säilyivät sulamisen jälkeen stabiileina.



Kuva 3.4. Huokospaineen ja muodonmuutoksien kehittyminen saven jäädytys-sulatuskokeessa (Kujala & Laurinen 1989).

Savimaassa tapahtuu neitseellisen jäätymis-sulamissyklin seurauksena tilavuudenmuutoksia, vaikka tarkasteltavaa kerrosta ei oman painon lisäksi kuormittaisi mikään ulkopuolinen lisäkuorma. Pelkät jäätyminen ja sulamisen aiheuttamat muutokset saven mikro- ja makrotason rakenteessa muuttavat konsolidaatio-ominaisuuksia siten, että tilavuusmuutoksia syntyy vallitsevien in-situ jännitysten johdosta.

Vähäaho et al. (1989) tutkivat Helsingin alueelta peräisin olevien savien ominaisuuksia jäädytys-sulatuskokein laboratoriossa ja täyden mittakaavan kenttäkokeilla. Laboratoriokokeissa todettiin sulamiskonsolidaatioasteen pienentyvän merkittävästi jo toisella jäätymissyklillä, mutta konsolidoitumista esiintyi myös vielä kolmannen jäädy-

tyssykin jälkeen. Näiden havaintojen pohjalta on esitetty empiirinen kaava 3-14 neitseellisesti jäätyvän savikerroksen sulamiskonsolidaatiopainumaksi A prosentteina

$$A = \frac{w}{k_1} \quad (3-14)$$

jossa w on saven alkuperäinen vesipitoisuus ja $k_1 \approx 3$ on vakio. Toisen ja kolmannen kerran jäätymis-sulamissykleille on esitetty vakioiden arvot $k_2 \approx 20$ ja $k_3 \approx 40$.

3.3.2 Lujuusominaisuuksien muutokset

Välittömästi sulamisen jälkeen maahan pidättyvän veden määrä ja poistumisnopeus ovat konsolidoitumisen ohella ratkaisevat tekijät lujuusominaisuuksien kehittymisen kannalta. Kuivaan tilaan nähden alentunut leikkauslujuus saattaa altistaa kyllästyneen kerroksen suurille leikkausvoimista johtuville muodonmuutoksille, koska jännitys-muodonmuutosriippuvuuden tiedetään olevan pääsääntöisesti epälineaarista. Tällöin sama lisäkuorma, joka maan kyllästysasteen ollessa matala ei aiheuta suuria muodonmuutoksia, lähellä kyllästystilaa olevilla kosteuspitoisuuksilla johtaa suuriin leikkausvoimista johtuviin muodonmuutoksiin. Myös osittain kyllästyneessä maassa voidaan havaita heikkenemistä sulamisen jälkeen pienentyneen matriisi-imupaineen takia.

Määriteltäessä maan lujuutta tarkoitetaan sillä tarkasteltavan materiaalin kykyä vastustaa leikkausvoimista johtuvaa murtumista. Yleisesti geotekniikassa käytetty maan leikkauslujuuden kuvaustapa on yhtälön 3-15 Mohr-Coulombin murtosuora

$$\tau = c + \sigma' \tan \varphi \quad (3-15)$$

jossa maan lujuus koostuu koheesiosta c ja tehokkaan jännityksen σ' sekä kitkakulman φ mukaan määräytyvästä partikkelien välisestä kitkavoimasta. (Cernica 1995.) Kitkasta muodostuva lujuuden osuus riippuu siis tarkasteltavalla syvyydellä vallitsevasta jännitystilasta ja maalajin rakeisuudesta sekä pintaominaisuuksista riippuvasta kitkakulmasta. Koheesion osuus lujuudesta vaihtelee voimakkaasti maalajin rakeisuuden mukaan. Pienien partikkelijakeiden osuuden kasvaessa suureksi lisääntyy koheesion osuus lujuudesta, koska veden tartunnan merkitys rakeiden kontaktipisteissä kasvaa. Kaikkein hienorakeisimmilla lajitteilla, lähinnä savilla, osa koheesiosta muodostuu myös vesimolekyylien ja maapartikkelien välisistä sähköstaattisista voimista. Savillekin on kolmiaksaalikokeen tuloksesta määritettävissä kitkakulma, mutta vallitsevan tehokkaan jännityksen määrittäminen ja näin ollen kitkasta muodostuvan lujuuden laskeminen on usein vaikeaa. Silteillä raekontaktien kitkasta muodostuvan lujuuden on mahdollista kehittyä nopeasti savia huomattavasti paremman vedenläpäisevyyden takia. Näin ollen kitkakulman käyttö tulee kyseeseen lujuutta määritettäessä, mutta se

tulisi määrittää kolmiakσιαalikokeiden perusteella, koska muodonmuutokset ovat voimakkaasti riippuvaisia jännitystasosta.

Osittain kyllästyneessä maassa huokosvesi pyrkii järjestymään maarakeiden kontaktipintojen ympärille niin sanottuun meniscus-muotoon kapillaarivoimien johdosta siten, että huokosissa oleva ilma pääsee muodostamaan yhtenäisen verkoston raerungon sisällä. Vedenpaine on aina pienempi kuin ilmanpaine maan kyllästysasteen ollessa selvästi alle 100 %. Bishop on esittänyt osittain kyllästyneessä maassa vallitsevalle kokonaisjännitykselle kaavan 3-16 mukaisen ratkaisun

$$\sigma = \sigma' + u_a - \chi(u_a - u_w) \quad (3-16)$$

jossa u_a on ilmanpaine ja χ on kokeellisesti määritettävä maan kyllästysasteesta riippuva kerroin. χ :n arvo kuivalle maalle on 0 ja täysin kylläiselle 1, joskaan arvo ei muutu lineaarisesti kyllästysasteen funktiona, vaan siihen vaikuttavat maan koostumus ja kyllästysasteen kehittymistapa. (Craig 2001.) Tekijä $\chi(u_a - u_w)$ kuvaa negatiivisesta huokosvedenpaineesta syntyvää matriisi-imupaineen osuutta, joka toimii maapartikkelien välisiä kosketusvoimia vahvistavana mekanismina optimivesipitoisuuteen saakka. Jäätymis-sulamissykleillä on todettu olevan merkittävästi matriisi-imupainetta heikentävä vaikutus, mikä johtaa myös resilient-moduulin (kts. luku 3.4.2) alenemiseen (Fredlund et al. 1975).

Riippuen maan vedenläpäisevyydestä, saattaa konsolidoituminen kestää huomattavasti pidempään kuin sulaminen; etenkin jos sulaminen on hyvin nopeaa. Tällöin huokosveden ylipaineen on mahdollista kehittyä sulaneen kerroksen alaosaan, ja maan kyllästyminen aiheuttaa näennäisen koheesion häviämisen. Samalla tehokkaat jännitykset rakeiden välillä heikkenevät pienentäen rakeiden välisen kitkan antamaa lujuutta. (Tsytoich 1975.) Kuten edellä esitellyistä sulamiskonsolidaatiota käsittelevien kokeiden tuloksista voidaan nähdä, tippuvat tehokkaat jännitykset hienorakeisissa ja vedellä kyllästetyissä maalajeissa dramaattisesti heti sulamisen jälkeen. Tällöin maan lujuuskato on suurimmillaan ja mahdollinen lisäveden saanti voi tiputtaa tehokkaat jännitykset noltaan, mikä tarkoittaa käytännössä maan juoksettumista.

Kuivumisen päätyttyä jäätymis-sulamissyklille altistuminen kuitenkin lisää lujuutta ainakin savella. Vähäahon et al. (1989) kenttäkokeista saamien tulosten perusteella saven suljettu leikkauslujuus kasvaa häiriintymättömänä 33...60 % ja häiritynä 400...500 % jäätymis-sulamissyklin ja sitä seuraavan konsolidoitumisen jälkeen. Suurimmaksi syyksi tähän todettiin mikroskooppisten savipartikkelien blokkiintuminen isommiksi rakeiksi. Jäätymis-sulamissyklin läpikäynyt savi muuttui silmämääräisesti tarkasteltaessa lähes siltinomaiseksi materiaaliksi, jonka lujuus muodostui suurelta osin kitkasta ja huomattavan pieneltä osin enää koheesiosta.

3.4 Sulamisen vaikutus kitkamaalajien mekaaniseen toimintaan

3.4.1 In-situ routiminen ja sulamispainuminen

Karkearakeisen materiaalin kyllästyminen

Sepeleitä lukuun ottamatta rakennemateriaaleina käytettävät murskatut kiviainekset ja lajittuneet luonnonmateriaalit sisältävät kaikenkokoisia partikkelijakeita laatuvaatimuksissa esitettyjen rakeisuusrajojen puitteissa. Sekarakeisuus ja hienoainespitoisuuden kasvu pienentävät keskimääräistä huokoskokoa, ja sitä kautta edelleen maan vedenläpäisevyyttä. Kuten edellä on todettu keskimääräisen huokoskoon pieneneminen mahdollistaa veden tartunnan kapillaarivoimien johdosta maarakeiden kontaktipintoihin. Tämän kontaktipintoihin tarttuneen veden jäätyminen alentaa maakerroksen vedenläpäisevyyttä nopeasti ja alkaa ikään kuin padottaa ylhäältä suotautuvaa vettä. Lopulta maahan muodostuu vettä läpäisemätön jääkerros, jonka muodostumistaso riippuu voimakkaasti maakerroksen alkuperäisestä vedenläpäisevyydestä. Toinen mekanismi tällaisen läpäisemättömän jääkerroksen synnylle on kerta toisensa jälkeen suotautuvan veden muodostamien jääpaanteiden synnyttämä blokki huokosten välisiin kapeisiin kanavakohtiin. Tämä sekundaarinen jäätymistapa tulee kyseeseen sellaisten huokostilojen väleissä, joihin kapillaarinen vesi ei pysty tarttumaan. (Fourie et al. 2007.)

Sulan veden pääseminen jäätyneeseen ratarakenteeseen on mahdollista leutoina talvina, jolloin lämpötila vaihtelee 0 °C molemmiin puolin tiheästi mahdollistaen lumen sulamisen. Myös räntä- ja vesisade voivat olla veden lähteitä leutoina talviaikoina. Näin ollen jäätyminen voi aiheuttaa karkearakeisen maan osittaisen kyllästymisen, mikä heikentää rakenteen ominaisuuksia sulamisen aikana luvussa 3.3.1 todetulla tavalla.

In-situ routiminen

Jäätyminen yhteydessä myös karkearakeisten maalajien rakenteessa tapahtuu muutoksia jäätyvän veden laajenemisen takia. In-situ routimisen 9 prosentin tilavuuden kasvu ja siitä seuraavan täysimääräisen routanousun syntyminen edellyttää tarkasteltavan kerroksen olemista täysin kyllästyneessä tilassa siten, että jäätyvä vesi ei pääse laajenemaan ympäröiviin tyhjiin huokostiloihin. Karkearakeisissa ja lajittuneissa maaloissa tällaiset olosuhteet esiintyvät hyvän vedenläpäisevyyden takia yleensä vasta pohjavesipinnan alapuolella, jonne routa useassa tapauksessa yltää harvoin tai ei ollenkaan.

Konradin ja Morgensternin (1981) esittämässä segregatiopotentiaali-teoriassa maahan syntyvä routanousu on jäätymisimupaineen nostaman ja in-situ huokosveden tilavuuden kasvun summa. Tarkasteltaessa maalajeja, joiden rakeisuus ei mahdollista jääty-

misimupaineen kehittymistä routaantumisen yhteydessä, saadaan routanousun suuruus Δh_i laskettua täysin kyllästyneessä maassa kaavan 3-17 mukaisesti

$$\Delta h_i = 0,09 n \Delta X \quad (3-17)$$

jossa n on maakerroksen huokoisuus ja ΔX tarkasteltavan kerroksen paksuus. Kaava ei huomioi alle 0 °C:n lämpötiloissa sulana pysyvän veden määrää (Nixon 1982). Tosin routimattomissa materiaaleissa hienoainespitoisuus on sikäli vähäinen, ettei jäätyvätöiden veden määrä muodostu merkittäväksi.

Sulamispainuminen

Hyvin vettäläpäisevän maakerroksen, josta huokosvesi pääsee purkautumaan vapaasti, painuminen sulamisen jälkeen on analoginen tapaus kuivan tilan tarkastelun kanssa. Tsytovin (1975) mukaan yksiulotteiselle tapaukselle, jossa sivusiirtymiä ei pääse syntymään, voidaan kuormituksen alaisen kerroksen painuma s laskea kaavan 3-18 mukaisesti

$$s = \frac{h}{1 + e_0} (\Delta e)_p \quad (3-18)$$

jossa h kerroksen paksuus, e_0 jäätyneen maan huokosluku ja $(\Delta e)_p$ kuormitusta vastaava huokosluvun muutos. Maalajikohtainen arvo $(\Delta e)_p$ voidaan määrittää ödometrissä tehtävällä jäädytys-sulatuskokeella.

Tasarakeiselle hiekalle, jossa 0,25–1 mm partikkeleiden osuus on yli 93 %, muutoksen $(\Delta e)_p$ on todettu olevan lineaarisesti kuormituksesta riippuva matalilla alle 3 MPa:n kuormilla. Tällöin huokosluvun muutos koostuu sulavan jään aiheuttamasta huokosluvun pienenemisestä ja kuormituksen aiheuttamasta kokoonpuristumasta, jolloin sulaneen tilan huokosluku e_{th} voidaan laskea tiettyä kuormitusta vastaavassa tilassa kaavan 3-19 mukaisesti

$$e_{th} = \bar{A} + \bar{a}p \quad (3-19)$$

jossa A on jään sulamisesta aiheutuva huokosluvun muutos, a huokosluvun riippuvuuden kulmakerroin kuormituksesta ja p kuormitus.

Tsytovin et al. (1975) tekemissä kuormituskokeissa karkearakeisten näytteiden painuminen sulamisen aikana riippui maan ominaisuuksien ja kuormituksen lisäksi pintalämpötilasta ja sen kehittymisestä. Vakiolämpötilassa tehdyissä sulatuskokeissa painumisen etenemisellä havaittiin lähes suora riippuvuus sulamisen etenemisestä kaavan 3-1 mukaisesti. Nostettaessa lämpötilaa näytteessä joko suora- tai käyräviivaisesti vaihteli sulamiskuvaajan muoto tällöin puoliparaabelista kaksoisasymptoottisek-

si. Koska vesi poistuu sulamisen kanssa lähes samaa tahtia, muuttuu painumanopeus vakiokuormituksella lämpötilan muutoksen mukaan. Kokeissa havaittiin täydellisen sulamisen jälkeen syntyvän pientä alle 10 prosentin suuruista painumaa, jonka arveltiin johtuvan raerungon hiipumisesta. Painumien ollessa kuitenkin luokkaa alle 5 mm näytteelle, jonka alkuperäinen korkeus oli 50 mm, voidaan näitä pieniä jälkipainumia pitää merkityksettöminä useimpien käytännön sovellutusten kannalta.

Neuvostoliitossa käytössä olleiden rakentamismääräysten- ja normien osan SNiP II-B.6-66 mukaan sulavaan kerrokseen syntyvää puristumaa ε_i voidaan kokeelliseen aiheistoon perustella approksimoida kaavan 3-20 perustella

$$\varepsilon_i = \frac{\gamma_t - \gamma_f}{\gamma_t} \quad (3-20)$$

jossa γ_f jäätyneen maan irtotilavuuspaino ja γ_t on sulaneen maan irtotilavuuspaino, jona voidaan käyttää kuivan maan irtotilavuuspainoa maksimitiiviydessä (Tsytoich 1975). Näin ollen kerroksellisessa maassa kokonaispainuma s_t voidaan laskea likimain kaavan 3-21 mukaisesti

$$s_t \approx \sum_0^{h_t} \varepsilon_i h_i \quad (3-21)$$

jossa h_i on kunkin tarkasteltavan kerroksen paksuus ja ε_i kokoonpuristuma. Menetelmän yksinkertaisuuden takia se olisi helposti sovellettavissa karkearakeisten materiaalien painumien arviointiin, koska tilavuuspainot on mahdollista määrittää kenttäkokeilla, eikä laboratorioissa tehtäviä ödometrikokeita tarvittaisi.

3.4.2 Resilient-ominaisuuksien muutokset sulaneessa maassa

Resilient-moduulin käsite ja moduulin vaikuttavat tekijät

Radan rakennekerroksissa käytettävien karkearakeisten ja routimattomien materiaalien käyttäytymistä sulamisen aikana on syytä tarkastella myös niiden kimmo-ominaisuuksien muutosten kautta. Näiden materiaalien koheesiomaihin verrattuna hyvä vedenläpäisevyys johtaa siihen, että sulamisen aikainen konsolidaatio ei muodostu muodonmuutoskäyttäytymisen kannalta merkittäväksi vaikka in-situ routiminen rakeiden uudelleen järjestymisen mahdollistaisikin. Hyvän vedenläpäisevyyden takia myöskään huokosylipaineiden kehittyminen ei ole vastaavanlainen ongelma kuin koheesiomailla. Kuormituksen alle joutuvan sulan kerroksen alapuolisen maan ollessa jäässä saattaa paikallisesti syntyä suuriakin huokosylipaineita, jotka heikentävät materiaalin kykyä ottaa kuormia vastaan, mutta ylipaine pääsee tällöinkin purkautumaan nopeasti ylöspäin kuorman poistuttua. Näin ollen karkearakeisten maamassojen täy-

dellinen lujuuskato ei yleensä ole mahdollinen. Sen sijaan muodonmuutosominaisuudet voivat sulamisen johdosta muuttua hyvinkin paljon.

Rakeisten materiaalien muodonmuutuskäyttäytymistä on tutkittu 1960-luvulta lähtien hyvinkin paljon, mutta yhtä kaikenkattavaa mallia ei ole ongelman moninaisesta luonteesta johtuen kyetty luomaan. Sitomattomaan rakeiseen materiaaliin, joka koostuu lukemattomasta määrästä erillisten partikkelien välisiä kontakteja, ei pystytä yleispätevästi soveltamaan pelkkiä partikkeli- tai kontinuumimekaniikan sääntöjä. Yleisesti tiedetään, että syklisessä kuormituksessa maahan syntyy aina sekä pysyvää että palautuvaa muodonmuutosta. Lukuisten tutkimusten perusteella tiedetään palautuvan muodonmuutoksen riippuvaan voimakkaasti vallitsevasta jännitystilasta, maan rakeisuudesta, kosteustilasta ja rakeiden muodosta sekä pinnanlaadusta. (Brecciaroli & Kolisoja 2006.)

Karkearakeisten materiaalien kimmoisuutta kuvataan resilient-moduulilla, joka määritellään deviatorisen jännityksen suhteenä sitä vastaavaan aksiaaliseen venymään. Syklisessä kuormituskokeessa pystytään tietyn kuormituskertamäärän jälkeen havaitsemaan stabiloitunut sykli, jossa deviatorisen jännityksen tippuessa nollaan yksittäisen kuormituksen jälkeen venymä palautuu likipitään kokonaan. Tämä ei täysin vastaa todellisuutta, mutta pysyväksi jäävän muodonmuutoksen osan ollessa riittävän pieni, idealisointi vastaa todellisuutta hyvällä tarkkuudella. Moduulin määrittäminen tehdään kolmiakksiaalikoelaitteistolla, jossa vallitsevaa sellipainetta varioimalla pystytään jäljittelemään halutunlaista in-situ jännitystilaa. (Brecciaroli & Kolisoja 2006.)

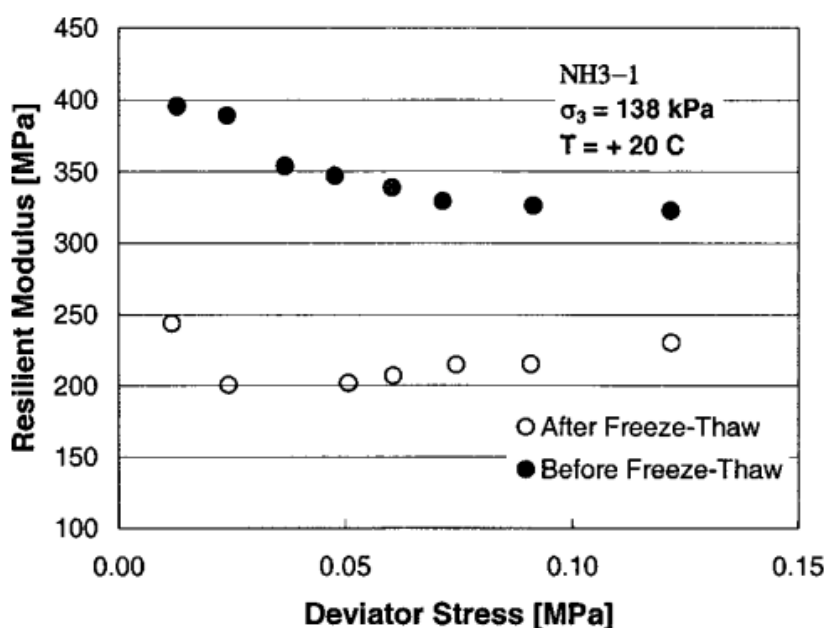
Niin kuin edellä on todettu, maan käyttäytyminen ei ole ikinä täysin kimmoista, vaan kuormituksen aiheuttamassa muodonmuutoksessa on aina pysyvä ja palautuva osa. Maan moduuliarvon heiketessä kokonaismuodonmuutoksen taso kasvaa ja tällöin myös pysyvän muodonmuutoksen osuus tulee suuremmaksi. Veden vaikutus on lukuisissa tutkimuksissa todettu erittäin merkittäväksi tekijäksi pysyvien muodonmuutosten syntymisen kannalta. Vaikutusmekanismiksi on esitetty, että vesi toimisi ikään kuin voiteluaineena partikkelien välistä kitkaa heikentäen ja näin edesauttaen niiden järjestymistä uuteen asemaan. Vesi myös edesauttaa partikkelien välisestä hankautumisesta johtuvaa kulumista.

Huokosvedenpaineen kehittyminen maan jäykkyyttä alentavaksi tekijäksi on todettu vaativan yli 80 prosentin kyllästysasteen. Optimivesipitoisuuteen asti veden määrän kasvu kasvattaa maan jäykkyyttä rakeiden kontaktipisteisiin sitoutuneen veden aiheuttaman näennäisen koheesion kasvun myötä, mutta sen ylittävä vesipitoisuus alkaa pienentää resilient-moduulia. Kosteuspitoisuuden kehityssuunnallakin on vaikutusta siten, että samalla kosteuspitoisuudella voidaan saada mitattua erisuuruisia jäykkyyksiä riippuen siitä, onko se saavutettu kuivattamalla vai kostuttamalla materiaalia. Tätä voidaan selittää seuraavasti: kuivumistilanteessa maakerroksessa vallitseva imupaine

saa veden jäämään hienoaineksien huokoskulmin kapillaarivoimien takia siten, että hienoin aines blokkiutuu isompien rakeiden kosketuspintojen ympärille toimien jonkinasteisena sidoksen. (Brecciaroli & Kolisoja 2006.) Maan kostuessa pieneen vesipitoisuuteen vesi ei järjesty maarakeiden väliin samalla tavalla kuin kuivuessa, eikä näin ollen kehity yhtä voimakasta veden pintajännityksen aiheuttamaa tukevaa mekanismia.

Resilient-moduuli sulamisen jälkeen

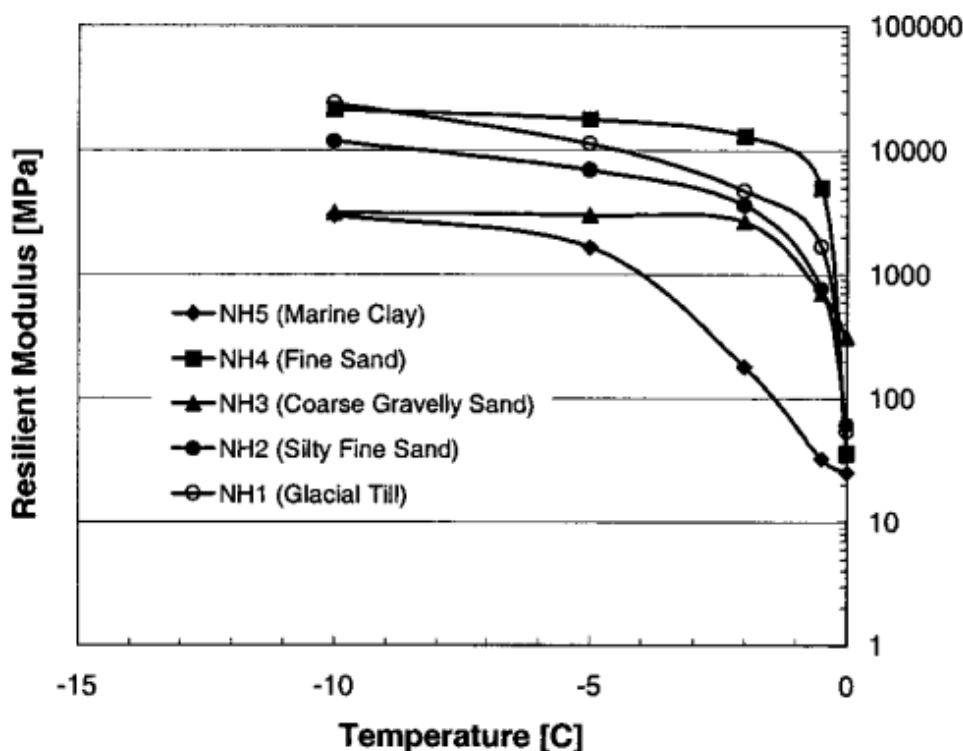
Simonsen et al. (2002) tutkivat useiden erilaisten luonnonmaalajien resilient ominaisuuksia kausittaisissa jäätymisolosuhteissa. Rakennemateriaalien käyttäytymistä tarkasteltaessa mielenkiintoisia ovat tulokset soraisen hiekan osalta, joka ei sisältänyt hienoainesta ja 5 mm:n kohdalla läpäisyprosentin ollessa 50. Kuvassa 3.5 on esitetty materiaalille määritetyt moduuliarvot ennen ja jälkeen sulamisen. Sulamisen jälkeinen koestus on tehty välittömästi ilman, että näyte on saanut kuivua. Moduuliarvot sulamisen jälkeen ovat suuruusluokaltaan selvästi pienempiä, eikä arvoissa esiinny vastaavanlaista kasvua deviatorisen jännityksen pienentyessä kuin kuivassa tilassa.



Kuva 3.5. Soraisen hiekan resilient-moduulin kehittyminen sulamisen jälkeen erisuuruuksilla deviatorisen jännityksen arvoilla (Simonsen et al. 2002).

Kuvassa 3.6 on esitetty kaikkien koestettujen materiaalien resilient-moduulin riippuvuus lämpötilasta alle 0 °C:n lämpötiloissa. Tuloksista on havaittavissa moduuliarvojen lasku jo selvästi ennen sulamista. Tämä olisi selitettävissä kasvavan sulan veden määrällä, ja sen takia maa-jää-matriisin jäykkyyden alenemisella. Sorainen hiekka kuitenkin säilyttää pisimpään jäätymisestä johtuvat korkeat moduuliarvot. Erot saven ja selkeiden kitkamaalajien välillä ovat erityisen selviä johtuen juuri sulana pysyvän veden määrästä. Tulosten perusteella voisi olettaa, että maakerroksia kuormitettaessa

pysyvien muodonmuutosten osuus alkaa kasvaa jo ennen kauttaaltaan tapahtuvaa rakenteen sulamista.



Kuva 3.6. Koestettujen materiaalien resilient-moduulien kehitys alle 0 °C:n lämpötiloissa (Simonsen et al. 2002).

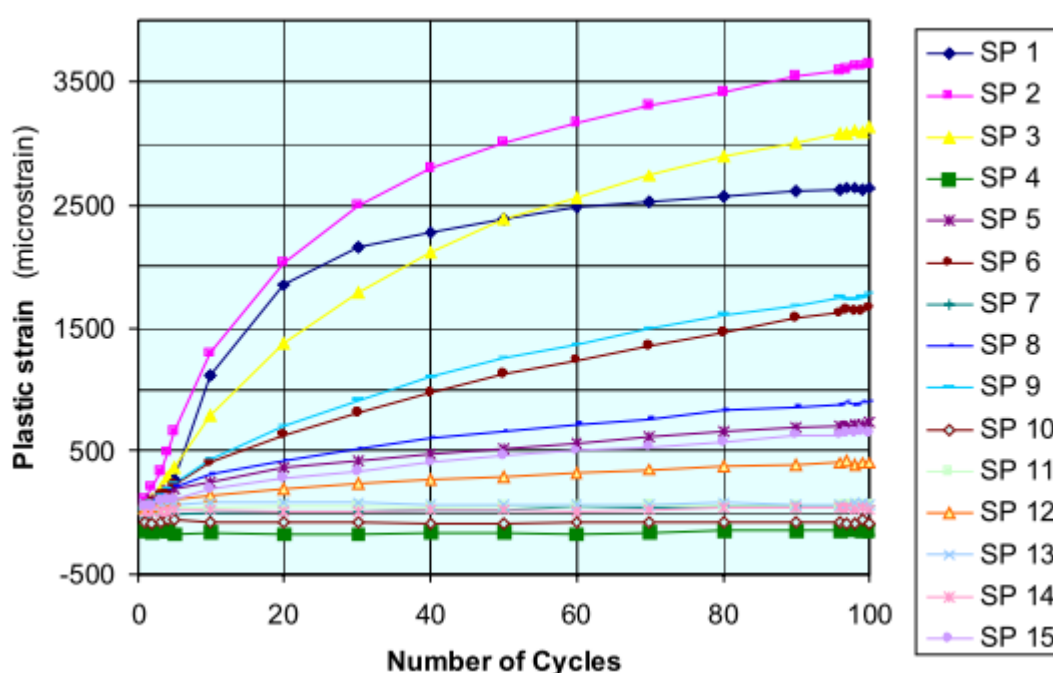
Muodonmuutosten syntyminen vastasulaneeseen maamateriaaliin

Tutkittaessa syklittäisessä kolmiaksaalikokeessa eri maamateriaaleihin syntyviä plastisia muodonmuutoksia on voitu todeta Mohr-Coulombin murtosuoran olevan luonnollinen raja sekä aksiaaliselle että säteittäiselle muodonmuutokselle. Näin ollen syntyvää muodonmuutosta voidaan estimoida vertaamalla mobilisoidun q_{\max} ja murtotilan q_{failure} deviatorisen jännityksen arvojen suhdetta $q_{\max}/q_{\text{failure}}$. Dawson ja Kolisoja (2004) ovat esittäneet tutkimusaineistoonsa perustuen yhtälön 3-22 mukaisen mallin kuvaamaan karkearakeisen materiaalin plastisen muodonmuutoksen ε_p riippuvuutta kuormituskerroista syklisessä kuormituksessa.

$$\varepsilon_p = a * N^b \quad (3-22)$$

jossa N on kuormituskertaluku, a on vakio 100 ja muuttuja b riippuu deviatorisen jännityksen q ja keskimääräisen pääjännityksen suhteesta q/p . Yhtälö on yksinkertainen sovitus kuvaamaan materiaalia, jonka muodonmuutuskäyttäytyminen on stabiloituvaa, eikä mallia tule ymmärtää yleispätevänä esityksenä karkearakeisten materiaalien deformaatiokäyttäytymisestä. Kokeissa käytettiin eri kosteustiloissa olevia murskattuja kiviaineksia, joiden mineralogia ja hienoaainespitoisuudet poikkesivat toisistaan.

Vastasulaneessa materiaalissa staattisen murtojännityksen arvo q_{failure} on kuivaa tilaa huomattavasti alempi. Käytännössä yksittäisen kuormituskerran aiheuttama rasitus pysyy ympärivuotisesti samana, jolloin sulamisen jälkeen rakenteeseen mobilisoituvaa jännitys käy huomattavasti lähempänä tätä murtotilan arvoa kuin rakenteen ollessa kuiva. Heikentynyt murtolujuus siis aiheuttaa suuremman plastisen muodonmuutoksen kuin vastaavilla kuormituskerroilla rakenteen ollessa vahvempi. Kuvassa 3.7 on esitetty kuinka suhteen q/p lähestyessä murtotilan arvoa alkaa plastisten muodonmuutosten määrä kasvaa merkittävästi. Sama toimii myös toisinpäin eli staattiseen murtoon tarvittavan arvon tippuessa ja kuormituksen pysyessä vakiona aiheuttaa jokainen yksittäinen kuormituskerta suuremman pysyvän muodonmuutoksen kuin lujuuden ollessa suurempi.



Kuva 3.7. Pysyvien muodonmuutosten kehittyminen sulamisen jälkeen kantavan kerroksen materiaaleissa 15:llä eri jännityspolulla, joilla kullakin kuormitettu erillistä näytettä 100 pulssin ajan (Dawson & Kolisoja 2004).

Yhdysvalloissa tehdyissä tutkimuksissa (Haynes & Yoder 1963, Thompson 1969, Janoon et al. 1997 mukaan) havaittiin yli 80 prosentin kyllästysasteen heikentävän merkittävästi karkearakeisen materiaalin kantavuutta toistokuormituksessa. Näitä tuloksia pyrittiin hyödyntämään määriteltäessä vaadittavia ominaisuuksia kiitoteiden rakennekerrosmateriaaleille. Keskeiseksi tekijäksi nousi se, kuinka kauan tietynpaksuisen rakenteen kesti laskennallisesti kuivua tähän rajakyllästysasteeseen, jossa riski merkittävälle ja nopealle vaurioitumiselle on poistunut. Rakennekerrosmateriaalien hienoaainespitoisuuden havaittiin olevan määräävä tekijä kosteuden pidättymisessä rakenteeseen ja sitä kautta alentuneiden resilient-ominaisuuksien aiheuttaja. Vertailtaessa eri paksuisten ja eri materiaaleista rakennettujen kerrosten kuivumisnopeutta to-

dettiin kuivumisajan kasvavan erittäin voimakkaasti alle prosentin suuruisillakin hienoineksen määrän lisäyksillä. Yli 10 prosentin hienoainespitoisuuksilla rakenteet eivät välttämättä ennättäneet sää- ja vuodenaikaisvaihteluiden takia kuivua kauttaaltaan haluttuun kosteustilaan lainkaan. (Janoo et al. 1997.)

Sulamisen jälkeinen kosteustila kehittyy rakenteen jäykkyyden ja toiminnan kannalta suotuisaan suuntaan päästessään kuivumaan. Kuormituksen kannalta kriittisimmät hetket ovat heti tukikerroksen sulamisen jälkeen, jolloin alapuoliset vielä jäässä olevat kerrokset estävät pinnan kuivumisen suotautumalla rakenteessa alas ja sivuille ojiin. Tällöin huokosylipaineiden kehittymisen riski on suurin, kun sulanut, ohut ja kylläinen rakenteen yläosa jää syklisen junakuorman ja jäätyneen rakenteen väliin. Syklinen kuormitus voi aiheuttaa kuivaan aikaan verrattuna huomattavasti suurempia pysyviä muodonmuutoksia alentuneen resilient-moduulin takia ilman, että huokospaineiden kasvusta johtuvia leikkausmuodonmuutoksia esiintyisi. Maan jäykkyys kuitenkin palautuu ajan kuluessa, koska kuivuminen saa veden taas siirtymään hienojen partikkelijakeiden huokoskulmiin ja sitomaan rakeita lujemmin toisiinsa.

3.5 Raidesepelin hienontuminen talvella ja hienontuneen materiaalin tiivistyminen sulamisen aikana

Talvella koko ratarakenteen jäykkyyden tiedetään kasvavan rakennekerroksissa olevan veden jäätyminen johdosta. Myös tukikerros jäätyy kokonaan tai osittain riippuen talven aikana toteutuvista leudoista jaksoista. Norjassa tehtyjen mittausten ja simulointien perusteella sepelikerroksen keskimääräiseksi vesipitoisuudeksi oletetaan 2 % sulassa ja 10 % jäätyneessä tilassa (Johansen 1982). Tukikerroksen sepelin irtotiheys voi vaihdella elinkaaren alun ja lopun välillä noin 1600 t/m³:stä 2200 t/m³:iin (Nurmi-kolu & Kolisoja 2010), jolloin 10 prosentin vesipitoisuudella kyllästysaste voi laskennallisesti vaihdella noin 40 prosentista lähes täysin kylläiseen. Tukikerroksen hienontumisasteella voidaan otaksua olevan merkittävä vaikutus vesipitoisuuden kehittymiseen, koska 10 prosentin arvo edellyttää tukikerroksessa olevan merkittävästi hienontunutta materiaalia, joka kykenee sitomaan talven aikana lumesta sulavaa vettä. Jäällä voidaan otaksua olevan edellä esitetyillä vesipitoisuuksilla merkittävä vaikutus tukikerroksen toimintaan talvikaudella.

Suomessa raidesepelin kuluneisuutta arvioidaan rakeisuusluvun perusteella, joka lasketaan 1, 8 ja 25 mm:n seulojen läpäisyprosenttien summana. Puhdistusrajana pidetään rataosan keskimääräisen rakeisuusluvun 88 ylittymistä. Ennen varsinaiseen puhdistusrajaan asti hienontumista on tukikerrosmateriaaliin kertynyt runsaasti hienompia partikkelijakeita, joita ei alun perin raidesepelilajitteessa ollut. Hienoainesta kertyy tukikerrokseen myös ympäristöstä tuulen mukana ja huonolaatuisten alusrakenteen tapauksessa tunkeutumalla liikennekuormituksen vaikutuksesta. Tukikerroksen eri osiin kerääntyvät hienot partikkelijakeet aiheuttavat pahimmassa tapauksessa tukiker-

rosmateriaalin muuttumisen routivaksi (Nurmikolu 2004). Näin ollen alentuneen vedenläpäisevyyden takia voi olla riskinä, että kerroksen alaosa kyllästyy täysin syksyn ja talven aikana, eikä vesi pääse purkautumaan sulamisen etenemisen kanssa samaa vauhtia. Kun liikennekuormituksen aiheuttama pystyjännitys on vielä tukikerroksen alaosassa suhteellisen suuri, voi luvussa 3.3.2 esitetyllä tavalla huokosveden ylipaineiden esiintymisen riski olla suuri. Tukikerroksen eniten kuormitetuilla pisteillä ei ole vastaavanlaista sivuttaistukea kuin alapuolisissa rakennekerroksissa, joten huokosvedenpaineen hetkellinenkin kasvu voi johtaa leikkausvoimista johtuviin muodonmuutoksiin.

Raidesepelin hienontuminen on kaikkia liikennöityjä ratoja koskeva ilmiö, jota aiheuttaa pääosin liikennekuormituksen lisäksi raiteen koneellinen tukeminen. Talvella rata-pölkkyjen alustan jäykkyyden kasvaminen johtaa siihen, että kuorma välittyy harvempien pölkkyjen kautta tukikerrokseen kasvattaen yksittäisten pölkkyjen kuormaa, ja kuormitus keskittyy enemmän kiskon alapuolisiin kohtiin. (Nurmikolu 2004.) Tällöin erityisesti tukikerrokseen mobilisoituvat pystysuuntaiset jännitykset kasvavat sulan ajan tilanteeseen nähden. Vaikka jää sitoo maarakeita ja estää niiden liikkeitä toisiinsa nähden, voivat jännitykset kasvaa rakeiden kosketuspinnolla niin suuriksi, että sepe-
lin on mahdollista murtua ja hioutua. Ympäröivä jää kuitenkin rajoittaa hienontuneen materiaalin uudelleen järjestymistä, jolloin lopullinen uutta rakeisuusjakaumaa vastaavaan tiiviyyteen järjestyminen tapahtuu vasta tukikerroksen kauttaaltaan sulettua.

4 RATAKOHTEIDEN MONITOROINTI

4.1 Instrumentointi

Osana Elinkaaritehokkaan radan tutkimushanketta kehitettiin kenttämittausjärjestelmä ratapenkereen lämpö- ja kosteustilan havainnoimiseksi sekä ratapölkyn siirtymien mittaamiseksi. Tarjolla olevien kaupallisten järjestelmien selvittämisen jälkeen päädyttiin rakentamaan järjestelmä eri valmistajien toimittamista antureista, dataloggerista ja muista osista. Tiedonsiirto dataloggerista tapahtui GPRS-yhteyden avulla järjestelmän toimiessa oman vaihdettavan virtalähteen varassa. Kenttämittausjärjestelyn kehittäminen ja rakentaminen ei kuulunut osaksi tätä työtä, ja Luomala (2010) on raportoinut sen tarkemmin.

Routanousua ja painumista mitattiin pistemäisesti ratapölkyn päihin asennetuilla siirtymäantureilla. Anturin asennus on esitetty kuvassa 4.1. Mittausjärjestelmän vaatimukseksi asetettiin 1 mm:n tarkkuus. Kiintopisteiksi antureita varten asennettiin täryttämällä kairatangot sillä oletuksella, ettei routa tunkeudu missään tilanteessa kolmea metriä syvemmälle. Vanhat ratapenkeret ovat pääosin paksuudeltaan kaksi metriä tai vähemmän, joten noin kolmen metrin upotussyvyydellä päästiin mittauksien kannalta riittävän stabiiliin lopputulokseen. Lisäksi tankojen yläosan ympärille asennettiin suojaputket kahden metrin matkalle, jotta routimisen aiheuttamat liikkeet eivät siirtäisi tankoja. Anturit ja niitä suojaavat muovikotelot kiinnitettiin ratapölkkyjen päihin. Ratkaisu mahdollistaa helpon pääsyn käsiksi antureihin huoltojen yhteydessä, kun antureita tarvitsee siirtää liikevaran loppumisen takia esimerkiksi raiteen tukemisen tapauksessa. Anturit ovat malliltaan Novotechnikin TRS 50, joiden liikepituus on 50 mm. Kiinnitykset mahdollistivat noin kahden millimetrin dynaamisen liikkeen pölkylle ilman kotelon liikkumista. (Luomala 2010.)



Kuva 4.1. Ratapölkyn siirtymää mittaavan anturin asennus; suojakotelon kansi puuttuu kuvasta.

Penkereen ja pohjamaan lämpötilan seuraamista varten asennettiin kaksi lämpötila-anturisauvaa ratapölkkyjen väliin keskelle pengertä. Tähän ratkaisuun päädyttiin, koska yhtenäisen, kolmimetrisen tangon asentaminen penkereeseen olisi ollut erittäin hankalaa. Jos alempi sauva olisi hajonnut asentamisen yhteydessä, olisi ylempi ollut mahdollista asentaa vielä eri reikään. Sauvat on valmistettu 16 mm:n sähköputkesta, jonka sisään on kiinnitetty valumuovilla elektroniikkateollisuuden käyttämiä puolijohdeantureita. Tällä ratkaisulla saavutettiin yhtenäinen ja vesitiivis rakenne. Anturit oli kalibroitu ennen penkereeseen asentamista laboratoriossa vesihauteen avulla, jotta routarajan etenemisen seuraamiseen vaadittava 0,1 °C mittaustarkkuus saavutettiin. Ilmanlämpötilaa seurattiin monikerroksisen lämpökilven sisään sijoitetulla lämpötila-anturilla, jolloin mittaus vastasi lämpötilaa varjossa. (Luomala 2010.)

Penkereen kosteustilan tarkkailemiseksi alusrakenteeseen asennettiin kahdeksassa kohteessa kymmenen ja kahdessa kohteessa neljä kosteustila-anturia. Kattavammassa ratkaisussa kosteustilaa pystyttiin tarkkailemaan rakenteen pinnasta pohjamaan yläosaan asti. Suppeammassa järjestelyssä mittaus kattaa vain alusrakenteen. Anturit on asennettu asennushiekalla täytettyyn sähköputkeen, joten niistä havainnoitavat arvot kertovat hiekan kyllästysasteen ympäröivää maan kosteustilaa vastaavissa olosuhteissa. Penger materiaalin kosteuspitoisuuden määrittäminen edellyttää siis molempien materiaalien pF-käyrien tuntemista, jotta asennushiekan kyllästysaste voidaan muuntaa ympäröivän maan kyllästysasteeksi.

Mittausdataa on kohteesta riippuen rekisteröity dataloggeriin tunnin tai 15 minuutin välein. Datasta on laskettu kahden tunnin mediaanit ja edelleen päiväkohtaiset keskiarvot roudan syvyyden ja ratapölkkyjen päiden siirtymien määrittämiseksi. Näin kuvaajista on saatu helpommin tulkittavia, ja esimerkiksi vuorokauden aikojen välisestä lämpötilojen vaihtelusta syntyvä kohina siirtymämittaukseen on voitu häivyttää. Antureiden mittausvaran säilyttämiseksi niitä on pääsääntöisesti käyty nollaamassa lokakuussa, kun mittausjärjestelmään on vaihdettu täysinäinen virtalähde talvea varten. Näin ollen siirtymämittausdatassa esiintyy pistemäisiä hyppäyksiä joko anturin siirron tai raiteen kunnossapitoon liittyvän tukemisen takia. Epäjatkuvuuskohtia aiheuttivat alussa anturien irtoaminen pölkyn päästä ja joissain tapauksissa jäätyminen. Tämän takia yksittäisten anturin mittausdata voi paikoin olla epäjatkuvaa tai puuttua kokonaan. Myös johtojen ja suojakoteloiden satunnaista irtoamista havaittiin kohteille tehtyjen muiden mittauskäyntien yhteydessä, jolloin näitä pyrittiin korjaamaan mahdollisuuksien mukaan.

4.2 Kohteiden sijainnit ja rakenteet

Kattavan kuvan saamiseksi kohteita valittiin instrumentoitaviksi mittausjärjestelmän kehittämisen aikana siten, että Suomen erityyppiset ilmasto-olosuhteet tulevat edustetuiksi. Myös radan rakennetyyppejä on sekä päällys- että alusrakenteen osalta useita erilaisia. Yhteensä 14 kohteen tuloksista tässä työssä on hyödynnetty mittausdataa 12 kohteesta instrumentoinnin tyypistä tai datan laadusta johtuen. Taulukossa 4.1 on esitetty kohteiden sijainnit ja niihin tehty instrumentointi toiminta-aikoineen.

Tornion kohteista näytteitä on otettu vuonna 2009 päällysrakenteen uusimistyön yhteydessä, ja Hietala et al. (2010) ovat raportoineet näytteiden ottamisen ja niille tehdyt laboratoriotutkimukset. Eteläisten kohteiden näytteidenotto on tehty Penttilän (2012) diplomityöhön liittyen, ja näytteiden laboratoriotutkimusten tulokset on raportoitu työn yhteydessä. Alusrakenne on pääosassa kohteita ollut yhtä ja samaa materiaalia johtuen rakentamisajankohdan nykyisistä poikenneista vaatimuksista. Näin ollen erikseen välikerroksesta ja eristyskerroksen ylä- ja alaosa on otettu näytteitä vain Tornion kohteissa, joissa kerrosrajat ovat olleet erotettavissa.

Taulukko 4.1. Monitorointikohteiden sijainnit ja instrumentointi.

Monitorointi- kohde	Liikennepaik- kaväli	Ratakilo- metrit	Päälysrakenne- luokka/ sähköistetty	Lämpötila- anturit	Kosteusanturit
Toiminta-aika				kpl/syvyys (m)	kpl/syvyys (m)
Karkku (2008–2012)	Suoniemi-Karkku	255+266	C ₁ /kyllä	12/ 0,1...2,9	ei
Kitee (2010–)	Kesälahti-Puhos	441+725	C ₂ /kyllä	36/ 0,18...2,73	10/ 0,1...1,95
Kuopio (2010–2012)	Suonenjoki- Kuopio	442+260	C ₂ /kyllä	36/ 0,23...2,03	10/ 0,2...1,7
Liminka (2008–)	Liminka-Kempele	732+527	D/kyllä	12/ 0,1...3,1	ei
Tornio 899 (2008–)	Tornio-Niemenpää	899+498	D/ei	12/ 0,1...2,77	ei
Tornio 909 (2008–)	Tornio-Niemenpää	909+600	D/ei	12/ 0,1...3,1	ei
Tornio 921 (2009–)	Tornio-Niemenpää	921+050	D/ei	36/ 0,1...3,2	4/ 1...1,6
Tornio 925 (2009–)	Tornio-Niemenpää	925+610	D/ei	36/ 0,1...2,55	4/ 0,6...1,2
Tornio 932 (2009–)	Niemenpää- Kaulinranta	932+135	D/ei	32/ 0,1...2,8	10/ 0,2...2,2
Tornio 945 (2009–)	Niemenpää- Kaulinranta	945+060	D/ei	32/ 0,1...2,67	10/ 0,2...2,3
Varkaus (2010–)	Varkaus-Heinävesi	445+300	C ₂ /ei	36/ 0,22...2,4	10/ 0,24...1,8
Viiala (2008–)	Viiala-Mattila	156+287	D/kyllä	12/ 0,1...3,1	ei

Taulukossa 4.2 on esitetty poikkileikkaustyyppit, rakennepaksuudet ja -materiaalit. Huomattavaa on, että monessa paikassa alusrakenne on nykyvaatimuksiin verrattuna hyvin ohut ja paikoin tukikerros jopa alusrakennetta paksumpi. RATO 3:ssa annettujen routamitoitusohjeiden mukaiset riittävät routimattomat rakennekerrokset ovat ainoastaan kohteessa Tornio 899. Routaeristetyistä rakenteista Viialan kohteessa rakennepaksaus on routamitoitusohjeen kannalta riittävä, mutta alusrakennemateriaali on routivaa ja eristelevy on asennettu virheellisesti suoraan pohjamaan päälle.

Taulukko 4.2. Monitorointikohteiden rakennepaksuudet ja maalajit.

Monitorointi- kohde	Rakennekerros paksuudet (kerrosrajan syvyys) [m]		Maalajit (GEO)		Poikkileikkaus
	Tukikerros	Alusra- kenne	Alusrakenne (VK/EKY/EKA)*	Pohjamaa	
Karkku	0,7	0,45 (1,15)	srHkMr	siMr	Penger
Kitee	0,6	0,85 (1,45)	srHk	siHkMr (penger- täyte)	Penger
Kuopio	0,5+0,05 eristelevy (EPS)	0,75 (1,3)	srHk	siHkMr	Penger
Liminka	0,9+0,05 eristelevy (EPS)	0,5 (1,45)	Hk	ljSi	Penger
Tornio 899	0,6	2 (2,6)	**	**	Penger
Tornio 909	0,6	1,6 (2,2)	**	**	Penger
Tornio 921	0,5	1,1 (1,6)	srHk/srHk/srHk	srHkMr	Penger
Tornio 925	0,5	1,5 (2)	srHk/srHk/srHk	Hk	Penger
Tornio 932	0,5	0,9 (1,4)	srHk/Hk/Hk	srHk	Leikkaus
Tornio 945	0,5	0,8 (1,3)	Hk/Hk/Hk	Hk	Leikkaus
Varkaus	0,6	0,45 (1,05)	srHk	Ka	Penger/Leikkaus
Viiala	0,65	0,45 (1,1)+0,1 eristelevy (XPS)	srHkMr***	siHkMr	0-tasaus (kaksoisraide)

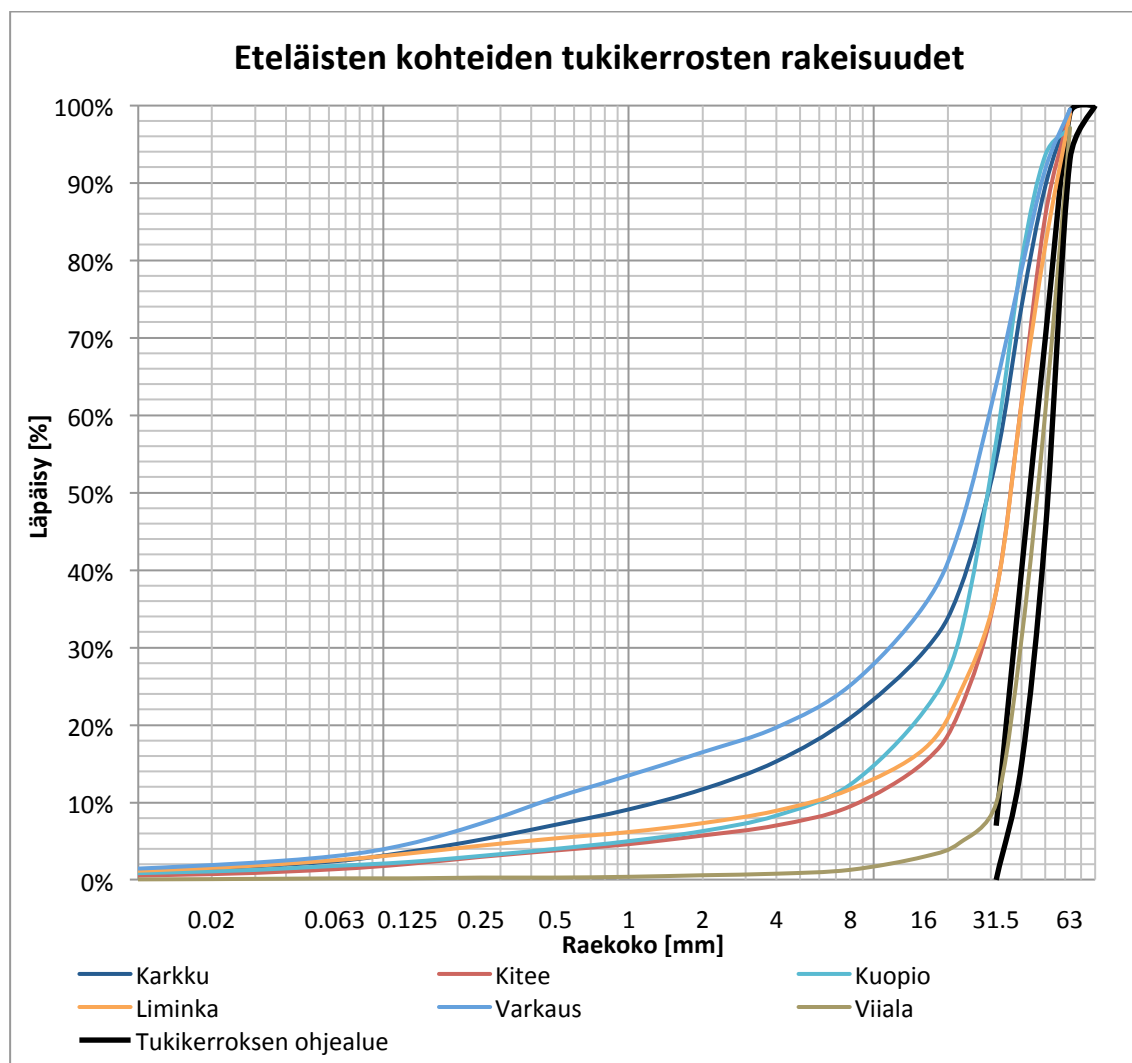
* VK = välikerros, EKY = eristyskerroksen yläosa, EKA = eristyskerroksen alaosa

**Näytteitä ei ole otettu.

***Materiaali ei syntytapansa perusteella ole moreenia, vaikka GEO-luokituksessa rakeisuutensa perusteella saa tämän nimen.

4.2.1 Tukikerrokset

Kuvassa 4.1 on esitetty eteläisten kohteiden tukikerroksnäytteiden rakeisuudet. Kaikista näistä voidaan havaita tyypillinen hienonemisesta johtuva suhteistuminen, mikä siirtää rakeisuuskäyrää pois sepelin ohjealueelta hyvin nopeasti rakeisuuslukujen kasvamatta vielä kovin suuriksi. Hienoainespitoisuudet eivät ole kasvaneet erityisen suuriksi, ja vain Varkauden kohde ylittää yleisesti routivuuden rajana pidetyn 3 prosentin arvon. Selvästi voimakkaimmin hienontuneita ovat Viialan ja Karkun näytteet.

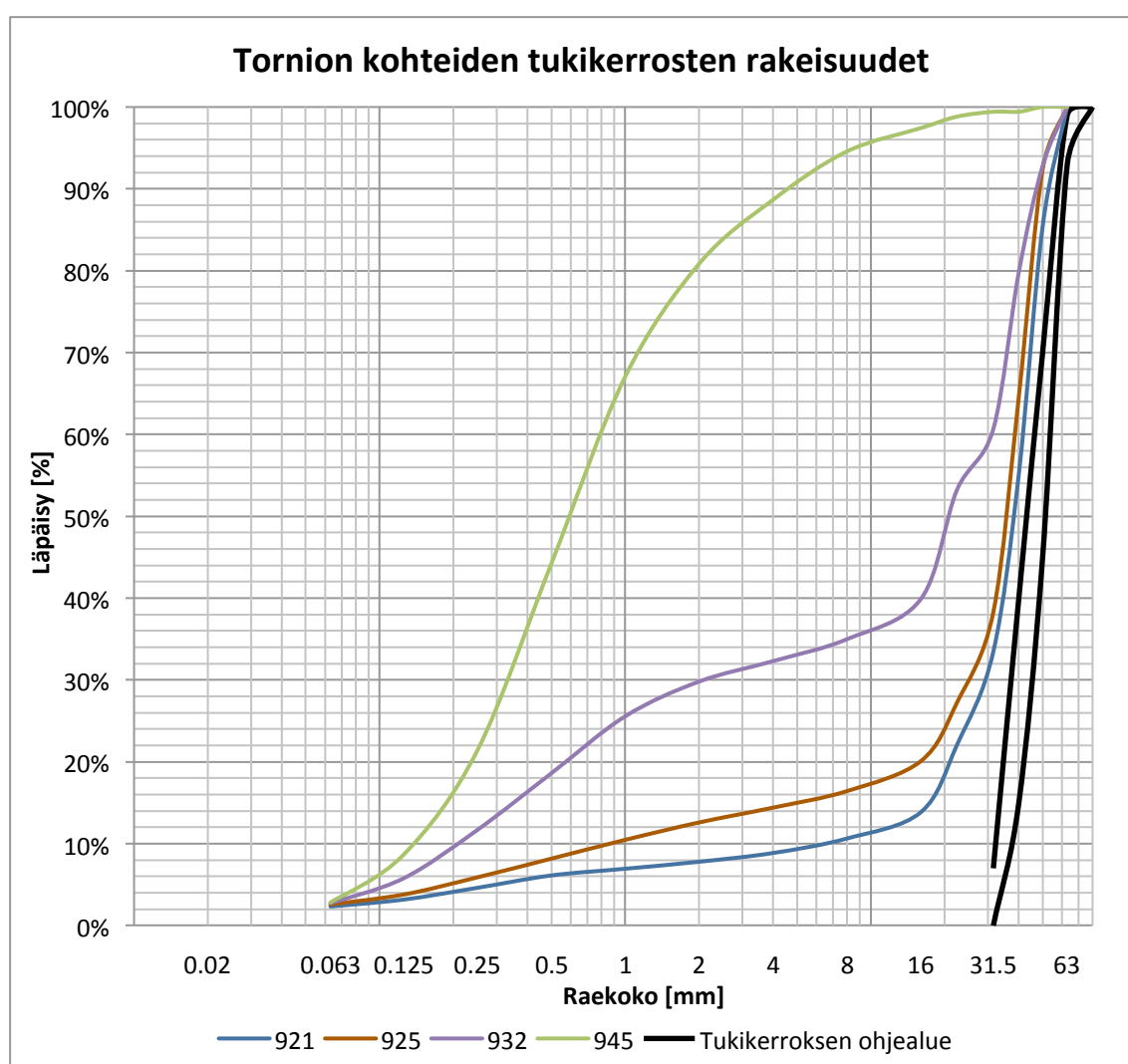


Kuva 4.1. Eteläisten kohteiden tukikerrosten rakeisuudet.

Eteläisten kohteiden tukikerroksnäytteistä ei ole tutkittu 25 mm:n seulan läpäisyprosentteja, joten rakeisuuslukuja ei ollut mahdollista määrittää. Kuvassa 4.2 on esitetty tukikerrosmateriaalien rakeisuudet Tornion kohteista, joista on otettu näytteet. Kohteet 921 ja 925 ovat suhteellisen karkearakeisia, mutta selvä hienonemisen eteneminen on havaittavissa. Taulukossa 4.3 on esitetty Tornion kohteiden rakeisuusluvut sekä hienoainespitoisuudet. Vaikka rakeisuusluvut vielä selvästi alittavat puhdistusrajan, on

tukikerroksissa merkittävästi hienorakeista materiaalia, joka kykenee pidättämään talvikaudella rakenteeseen suotautuvaa vettä.

Kohteen 945 tukikerrosmateriaali on ollut raidesoraa, joten suuri rakeisuussluku ja käyrän muoto eivät yksinomaan johdu materiaalin hienonemisesta. Otettu näyte todennäköisimmin edustaa tukikerroksen alaosan ja välikerroksen tasoa, joten rakeisuus ei ole täysin vertailukelpoinen tarkalleen tukikerroksesta otettujen näytteiden kanssa. Myös lähtötilanteen rakeisuus on tällöin ollut eri alueella kuin sepelistä tehdyillä tukikerroksilla. Kohteesta 932 ei ole saatu otettua rakeisuuskäyrän muodosta päätellen edustavaa näytettä. Näytteet edustavat Tornion kohteiden alkuperäistä tukikerrosta, jota on uusittu vuosina 2008 ja 2009.



Kuva 4.2. Tornion kohteiden tukikerrosmateriaalien rakeisuudet.

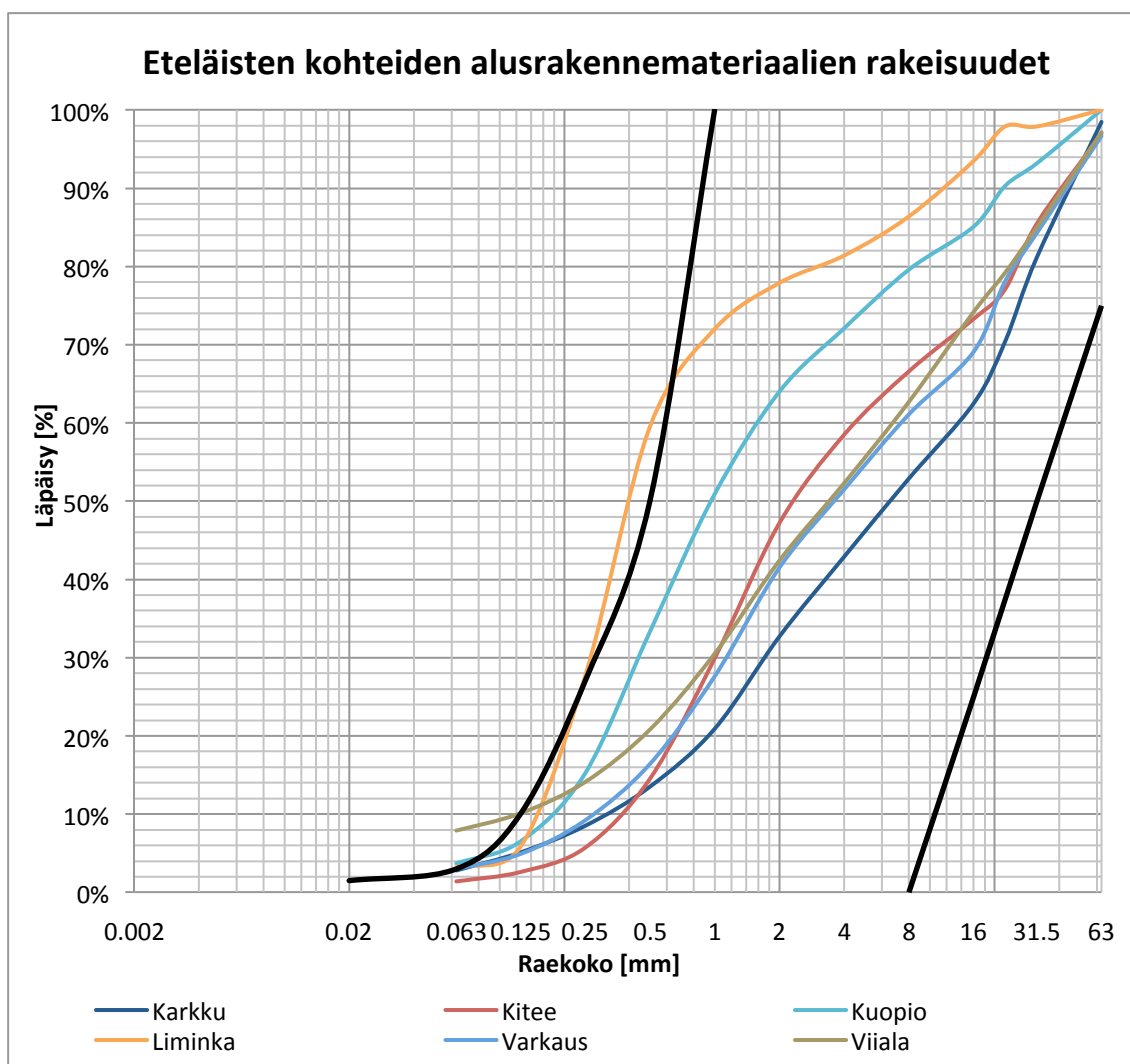
Taulukko 4.3. *Tornion kohteiden tukikerrosmateriaalien rakeisuusluvut ja hienoa-ainespitoisuudet.*

KM	Läpäisy-% 25 mm	Läpäisy-% 8 mm	Läpäisy-% 1 mm	Läpäisy-% 0,063 mm	Rakeisuus- luku
921+050	22,1	10,6	6,9	2,3	40
925+610	27,2	16,4	10,5	2,6	54
932+135	53,2	35,0	25,6	2,7	114
945+060	98,8	94,6	67,1	2,8	260

Tornio-Kolari rataosalla tehtiin päällysrakenteen uusimistöitä kesällä 2008 ratakilometrille 918 asti ja kesällä 2009 tästä eteenpäin. Työ toteutettiin auraamalla vanhaa sepelitukikerrosta 250 mm:n syvyydeltä pengerlevitteeksi, jonka jälkeen asennettiin 300 mm:n uutta sepeliä. Näin ollen vanhan tukikerroksen alaosa jäi uuden tukikerroksen alapuolelle. (Hietala et al. 2010.) Uudesta ja vanhasta materiaalista koostuvan tukikerroksen hakeutuminen stabiilimpaan asemaan liikennekuormituksen aiheuttaman tiivistymisen johdosta saattaa näkyä osaltaan Tornion kohteissa suurempina sulamispainumina ainakin työn valmistumisen jälkeisenä keväänä 2010. Tällä voisi selittää myös kulumisnopeuksien tasoittumista vuodesta 2009 eteenpäin.

4.2.2 Alusrakenteet

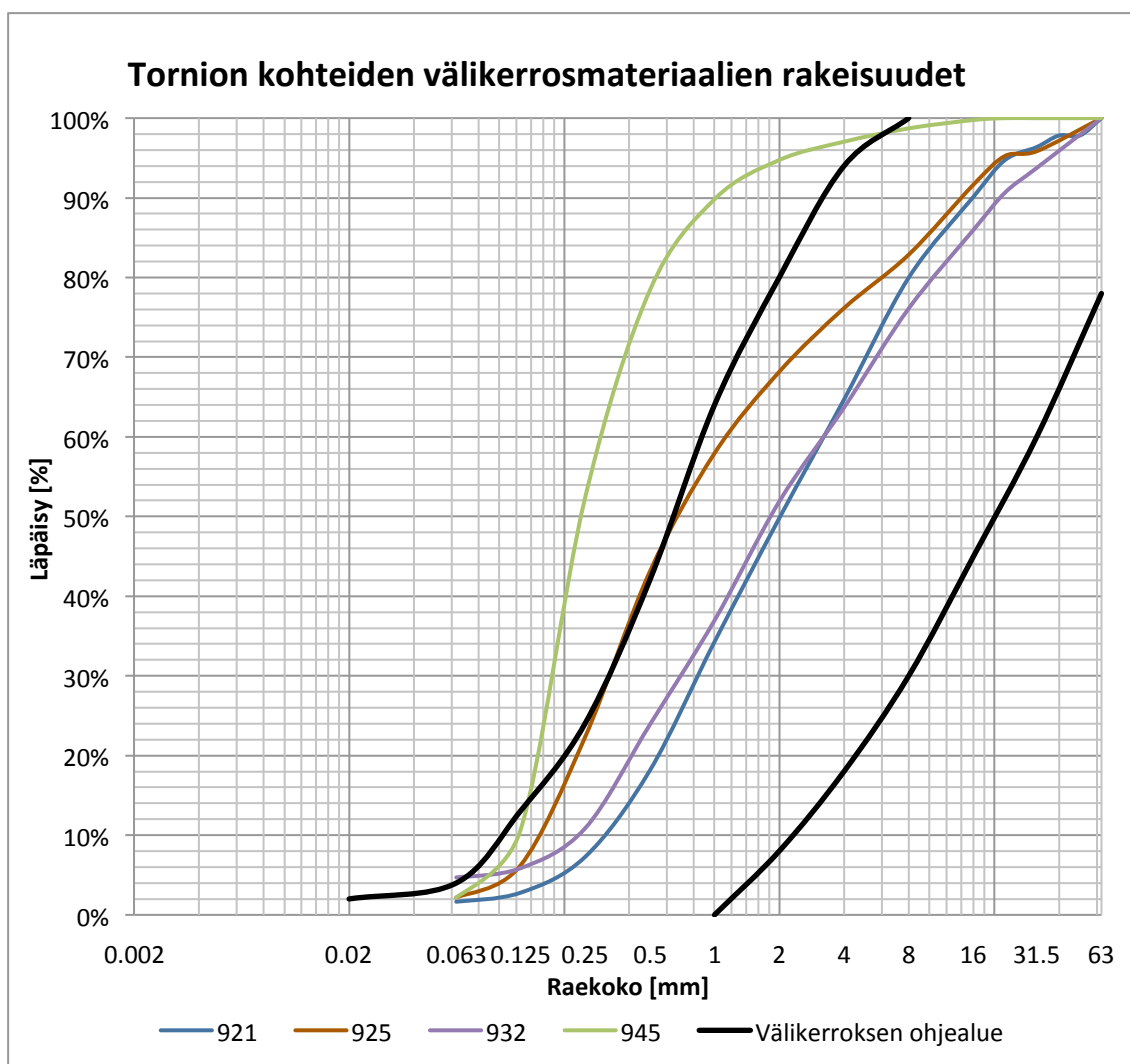
Eteläisten kohteiden alusrakenteet on rakennettu pääosin sorasta ja hiekasta. Viialan alusrakenne on rakeisuutensa perusteella moreenia, mutta alunperin todenäköisesti soraa. Penkereeseen on ajan saatossa voinut kulkeutua ympäristöstä ja erityisesti jauhuneesta tukikerroksesta hienoainesta, mikä on muuttanut alkuperäistä rakeisuusjakaumaa. Kuvassa 4.3 on esitetty eteläisten kohteiden alusrakennemateriaalien rakeisuudet. Vertailukohdaksi kuvassa on esitetty nykyiset vaatimukset yhdistetylle eristys- ja välikerrokselle.



Kuva 4.3. Eteläisten kohteiden alusrakennemateriaalien rakeisuudet.

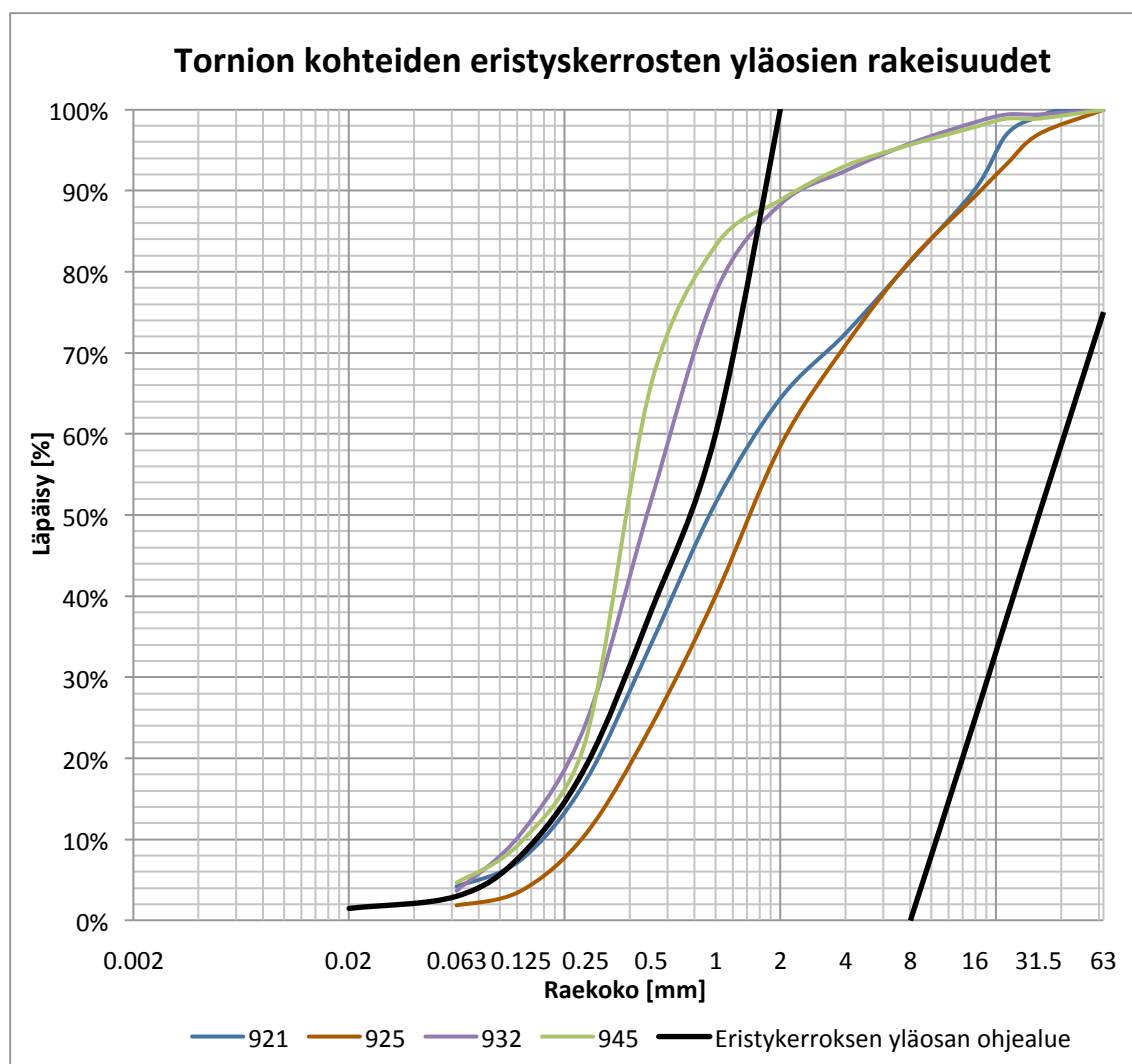
Hienoainespitoisuuden kolmen prosentin yläraja ylittyy kaikissa näytteissä. Tarkastelun kohteena olevia materiaaleja voidaan tässä suhteessa pitää epäkelpoina nykyisen ohjeistuksen näkökulmasta. Suurin liki 10 prosentin hienoainespitoisuus esiintyy Viialan kohteessa, mikä on veden pidättymisen ja poistumisnopeuden kannalta ongelmallisen suuri arvo. Hienoainesta karkeampien jakeiden osuudet osuvat verrattain hyvin nykyiselle ohjealueelle.

Kuvassa 4.4 on esitetty saatavilla olleiden Tornion kohteiden välikerrosnäytteiden rakeisuudet. Näytteet osuvat suhteellisen hyvin nykyiselle vaatimusalueelle. Ainoastaan kohteessa 945 hiekkajakeiden läpäisyprosentit ylittävät selvästi nykyiset ohjearvot ja kohteessa 925 rakeisuuskäyrä niukalti ylittää sallitun ylärajan. Hienoainespitoisuudet näytteissä pysyvät ohjealueella ja kohteessa 932 ylitys on hyvin pieni, minkä perusteella voidaan otaksua materiaalien olevan routimattomia.



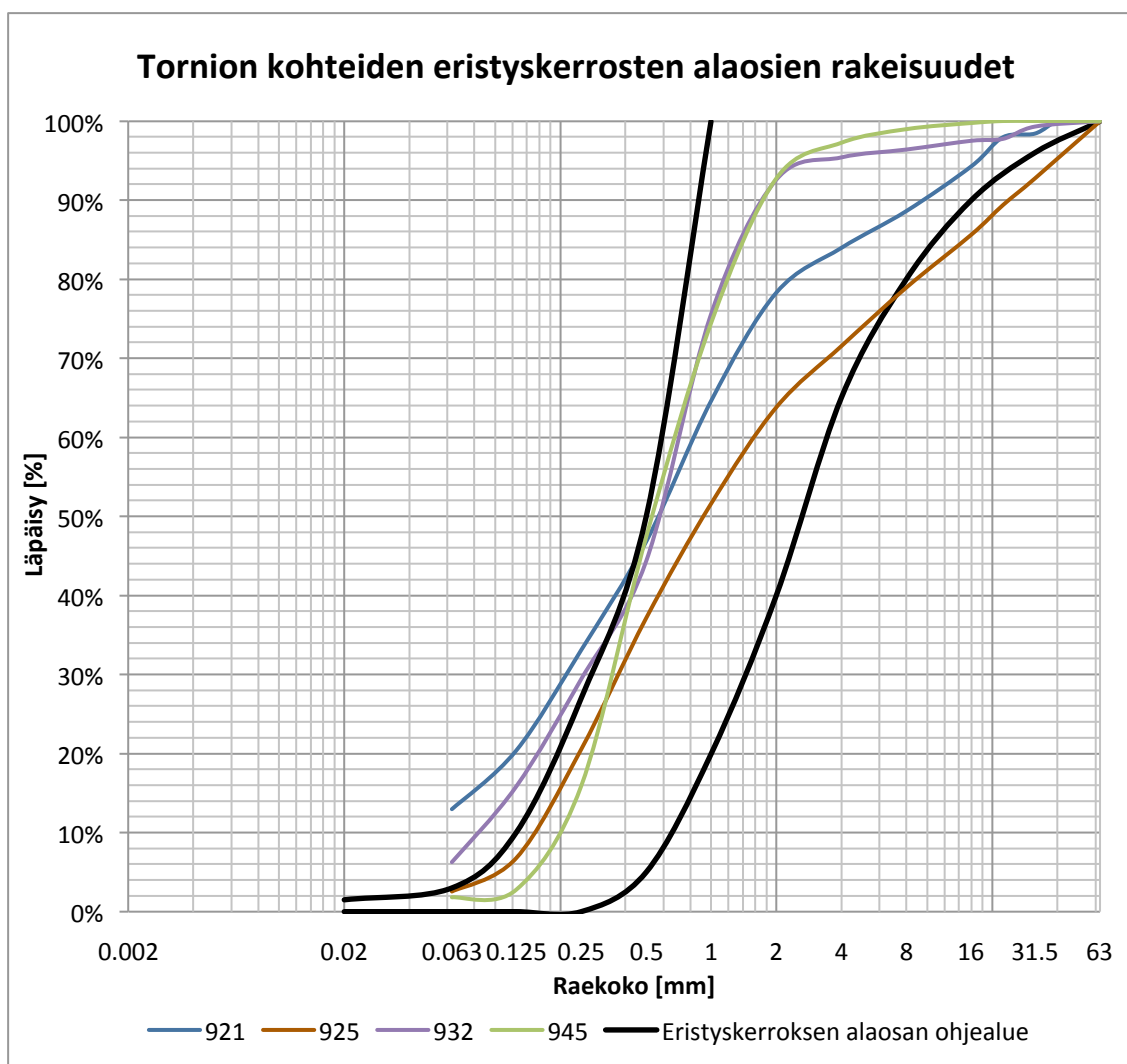
Kuva 4.4. Tornion kohteiden välikerrosmateriaalien rakeisuudet.

Kuvassa 4.5 on esitetty Tornion kohteiden eristyskerrosten yläosan rakeisuudet. Koh- teiden käyrät 932 ja 945 poikkeavat selvästi hiekkajakeiden osalta nykyiseltä ohjealu- eelta. Hienoainespitoisuudet kaikissa näytteissä ovat lähellä ylärajaa, ja ylittävät ohje- alueen hienoisesti kaikissa muissa paitsi kohteessa 925.



Kuva 4.5. Tornion kohteiden eristyskerrosten yläosien rakeisuudet.

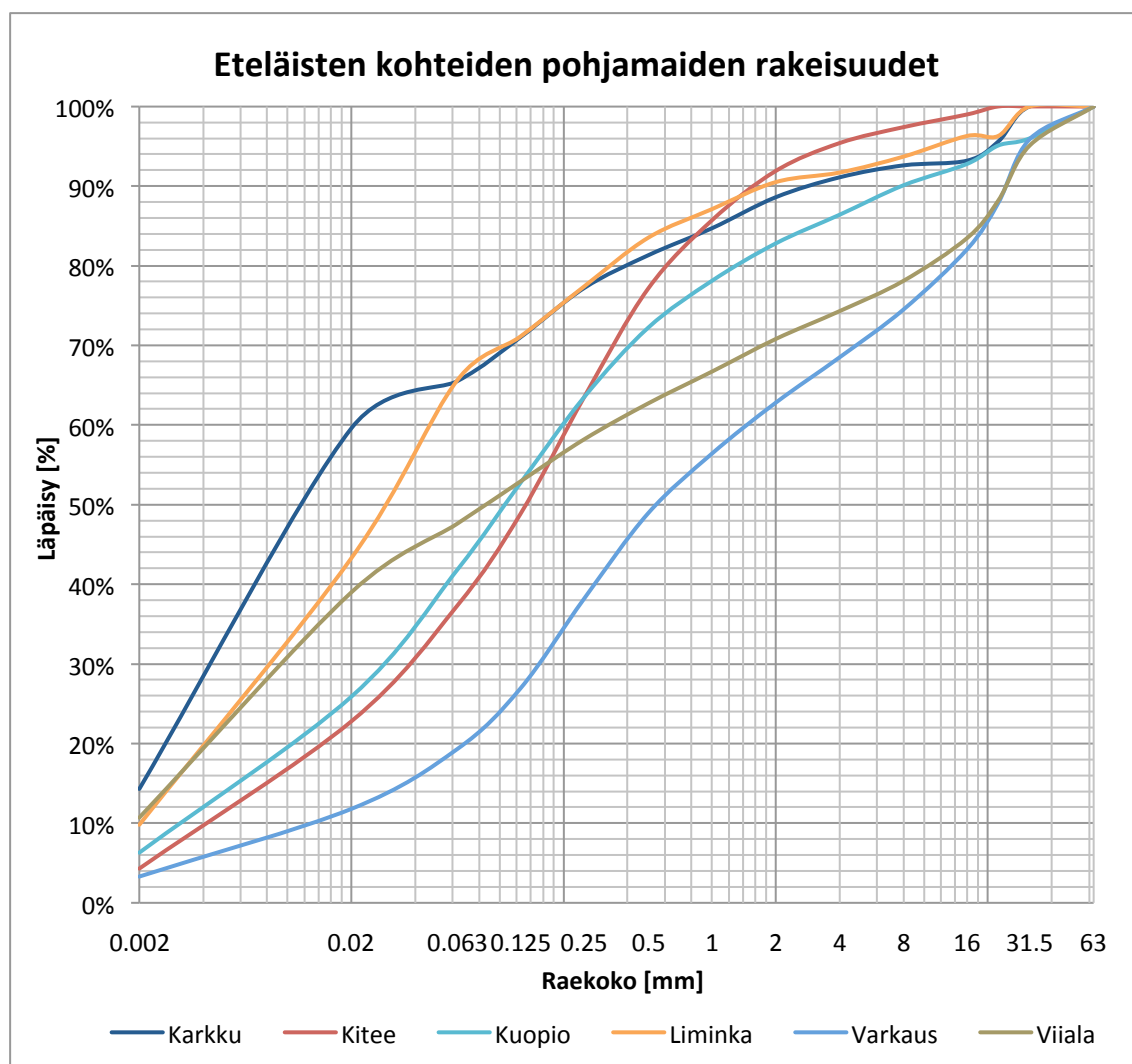
Kuvassa 4.6 on esitetty Tornion kohteiden alusrakenteiden alaosien rakeisuudet. Rakeisuuksien muoto on pitkälti vastaavaa kuin yläosankin näytteissä. Hienoaineksen läpäisyprosentit ovat jonkin verran suuremmat kohteissa 921 (13 %) ja 932 (6 %) yläosan näytteisiin verrattuna, minkä perusteella näytteiden voidaan otaksua olevan rouktivä. Ylitystä on rakeisuuden nykyiseen ohjealueeseen nähden jonkin verran hienon hiekan alueella 0,5 mm:n seulalle saakka. Kohteessa 925 sorajakeiden läpäisyprosentit eivät täytä nykyohjeen alarajan vaatimusta 8 mm:n seulasta ylöspäin.



Kuva 4.6. Tornion kohteiden eristyskerroksen alaosan rakeisuudet.

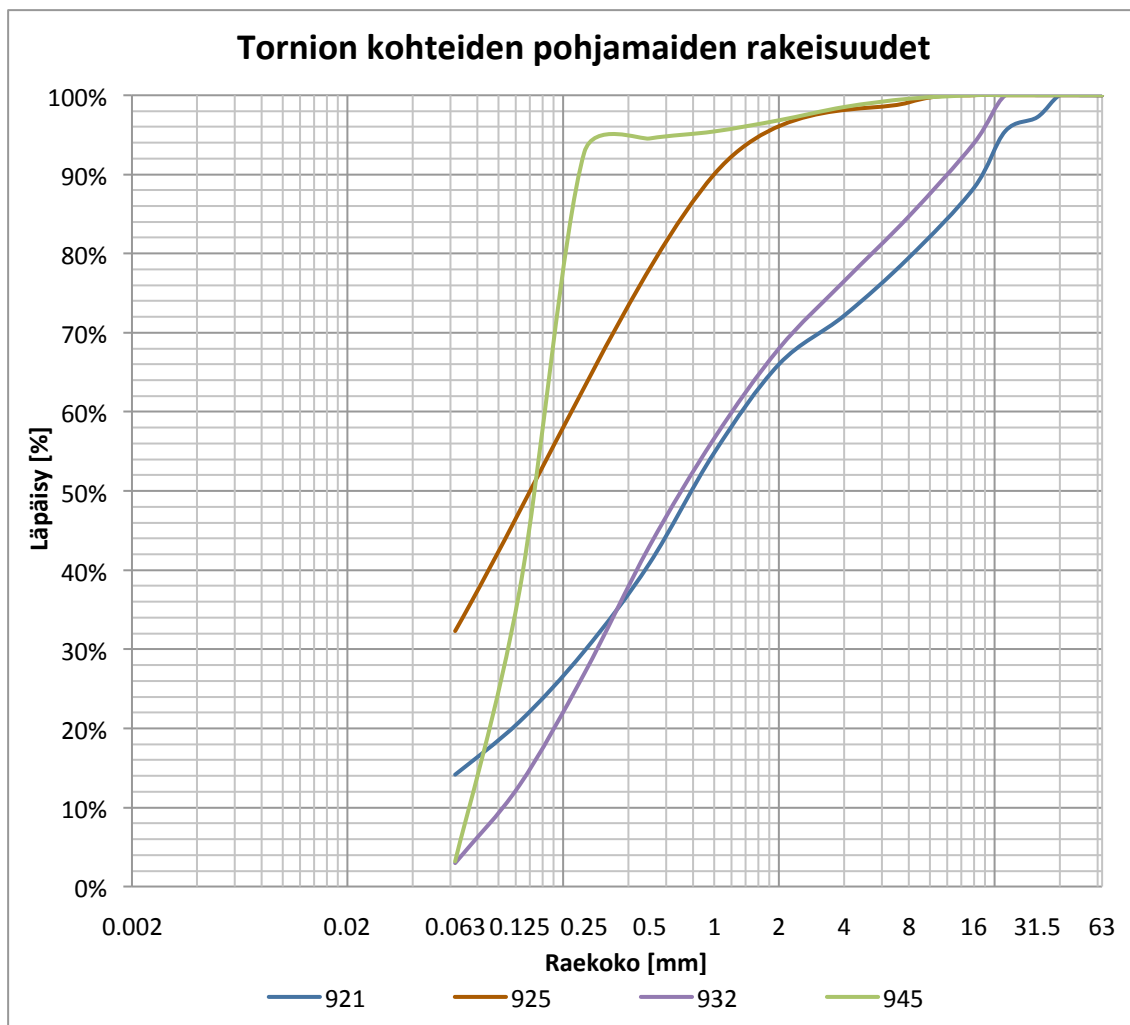
4.2.3 Pohjamaa

Kuvassa 4.7 on esitetty eteläisten kohteiden pohjamaanäytteiden rakeisuudet. Kaikki näytteet voidaan luokitella routiviksi hienoinenepitoisuuksien perusteella. Varkauden kohteessa näyte edustaa kallionpinnan päällä olevaa pengertäyttöä. Karkun kohteessa savilajitteen osuus on eteläisistä kohteista suurin, vaikka läpäisyprosentin perusteella tätäkään ei vielä saveksi luokitella.



Kuva 4.7. Eteläisten kohteiden pohjamaiden rakeisuudet.

Kuvassa 4.8 on esitetty Tornion kohteiden pohjamaiden rakeisuudet. Vaikka näytteenotto syvyys on 2,2 metriä korkeusviivan tasosta, edustaa näyte näissä kohteissa pohjamaata, koska rakennekerrokset eivät paksuudeltaan täytä nykyohjeiden 2,5 metrin vaatimusta. Näytteistä ei ole tutkittu hienoainesta alittavien jakeiden osuuksia, mutta hienoaineksen läpäisyprosentti jää alle kuuteen muissa paitsi kohteessa 921.



Kuva 4.8. Tornion kohteiden pohjamaiden rakeisuudet.

Tornion kohteiden pohjamaat ovat jokseenkin karkearakeisempia kuin eteläisten kohteiden. Nämä hiekkaiset pohjamaat läpäisevät huomattavasti paremmin vettä eteläisiin kohteisiin nähden, joista vain Varkaudessa hienoainespitoisuus on Tornio 925:tä matalampi. Kaikki Tornion kohteet ovat hienoainespitoisuutensa perusteella myös routivia, vaikka hajonta kohteiden välillä on suurta.

4.2.4 Rataosien liikennekuormitus

Luvussa 3 esitetyissä sulamispainuman syntymekanismeissa merkittävänä tekijänä on maan oman painon lisäksi jokin ulkoinen pintakuorma. Tämän takia tulee huomioida kuinka suurelle liikennekuormalle kohde mahdollisesti altistuu sulamisen yhteydessä. Koska tarkkoja mittauspisteen ylittäneitä akselimääriä tai bruttotonneja ei ole tässä yhteydessä mitattu, eikä katsottu suuren työmäärän takia tarkoituksenmukaiseksi selvittää, tyydytään vertailemaan kuormitusten suuruusluokkia vuositasona. Tämä antaa kuitenkin jo kohtuullisen hyvän kuvan siitä kuinka paljon liikennekuormituksesta johtuva rasitus vaihtelee kohteiden ja vuosien välillä.

Taulukkoon 4.4 on kerätty Suomen rautatietilastoista (2009–2012) kunkin monitorointikohteen kautta kulkenut miljoonat bruttotonnit. Tilastointi ei sisällä SM1-, SM2-, SM4- ja SM5-kalustojen kuormitusta, jotka ovat paikallisjunia. Näiden vaikutus voidaan olettaa kuitenkin pieneksi, koska monitorointikohteiden rataosilla paikallisliikenne on vähäistä tai sitä ei ole lainkaan. Suuret erot selittyvät sillä, että pienimmän kuormituksen alla olevilla radoilla on pelkkää henkilöliikennettä ja toisaalta taas Viialan kohde sijaitsee pääradalla, joka on maan eniten liikennöityjä rataosia. Taulukossa 4.5 on tavaraliikenteen osuus nettotonneina, joten vaunukaluston osuus puuttuu tästä määrästä. Tavaraliikenteen junien paino on pääsääntöisesti henkilöliikenteen junia suurempi, ja niiden akselipainot voivat saavuttaa suurimman mahdollisen rataosalle sallitun arvon. Tämän takia tavaraliikenteen osuuksien muutoksilla saattaa olla merkitystä, koska yksittäisten raskaiden junien aiheuttama kuormitus voi johtaa merkittäviin muodonmuutoksiin rakenteen menettäessä keväällä osan normaalista kantavuudestaan. Tässä yhteydessä valitun tarkastelutason yleisyydestä johtuen pitäydytään kuitenkin kokonaiskuormitusten vertailemisessa.

Taulukko 4.4. Monitorointikohteiden kautta kulkenut kokonaiskuormitus; miljoonat bruttotonnit vuosina 2008–2011 (Suomen rautatietilasto 2009–2012).

Kohde	2008	2009	2010	2011	Muutos 08-09 [%]	Muutos 09-10 [%]	Muutos 10-11 [%]
Karkku	9,6	7,6	8,3	8,2	-20,8	9,2	-1,2
Kitee	5,2	6,1	6,0	5,7	17,3	-1,6	-5,0
Kuopio	8,4	7,5	8,2	8,1	-10,7	9,3	-1,2
Liminka	13,2	13,0	13,2	13,2	-1,5	1,5	0,0
Tornion kohteet	1,1	1,1	1,2	1,0	0,0	9,1	-16,7
Varkaus	1,3	1,1	1,6	1,2	-15,4	45,5	-25,0
Viiala	29,2	25,3	24,9	23,3	-13,4	-1,6	-6,4

Taulukko 4.5. Monitorointikohteiden kautta kulkenut tavaraliikenne; miljoonat nettotonnit vuosina 2008–2011 (Suomen rautatietilasto 2009–2012).

Kohde	2008	2009	2010	2011	Muutos 08-09 [%]	Muutos 09-10 [%]	Muutos 10-11 [%]
Karkku	3,9	2,9	3,4	3,2	-24,5	14,5	-4,5
Kitee	1,6	2,2	2,1	1,5	34,2	-4,2	-26,7
Kuopio	1,9	1,3	1,4	1,4	-32,3	13,6	0,0
Liminka	4,4	4,2	4,4	4,4	-3,9	4,2	-1,4
Tornion kohteet	0,4	0,3	0,4	0,3	-11,7	30,1	-21,2
Varkaus	0,4	0,3	0,5	0,4	-41,3	98,8	-14,3
Viiala	5,3	4,1	4,2	3,9	-22,3	2,3	-8,2

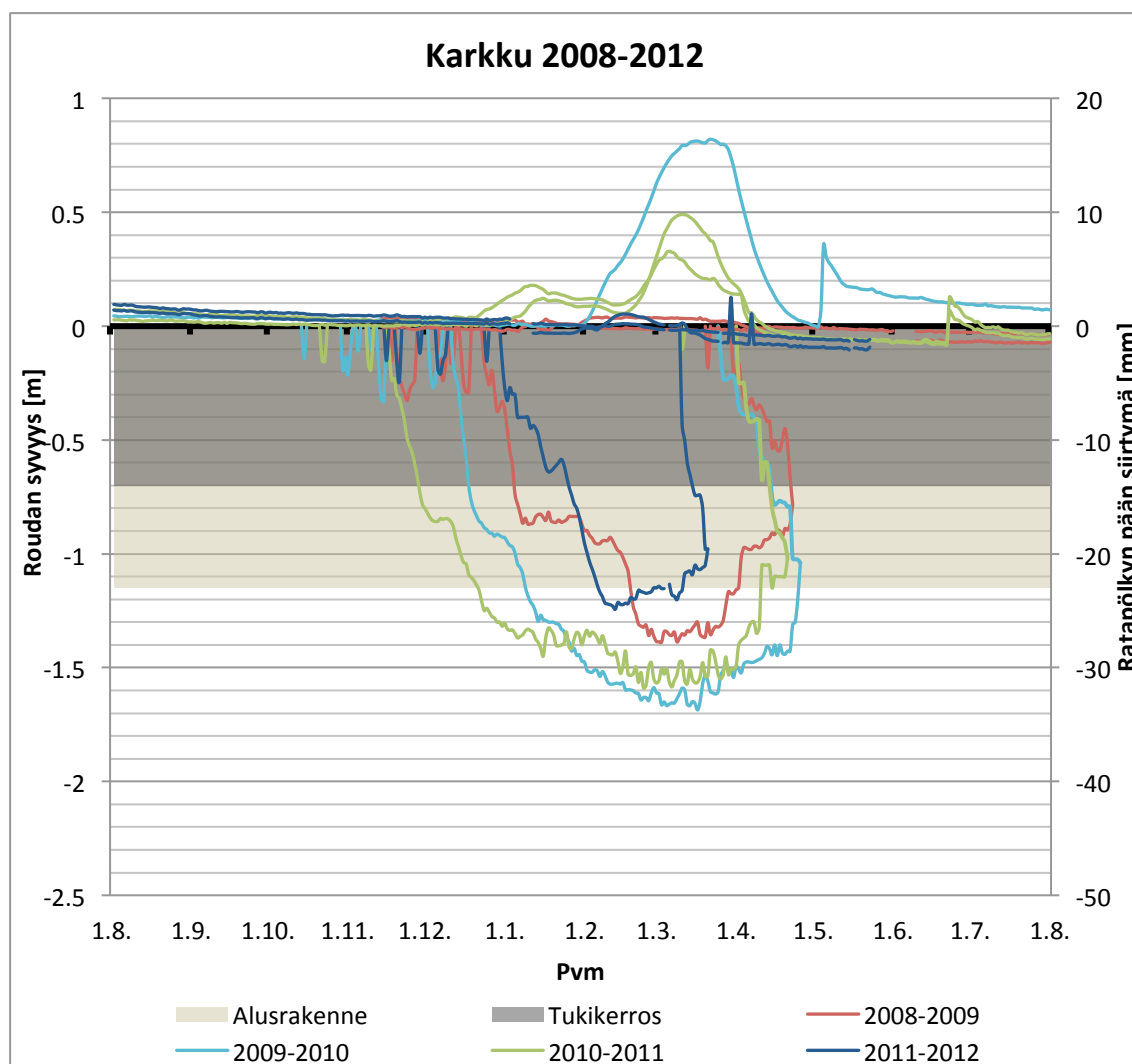
Muutokset kokonaiskuormituksessa ovat 2008–2009 välillä kautta linjan suurimmat, mutta tämän jälkeen pääosin alle 10 prosentin luokkaa. Vähäliikenteisillä Tornion ja Varkauden kohteilla pienetkin absoluuttiset muutokset näkyvät suurina prosentuaalisina muutoksina sekä kokonais- että tavaraliikenteen kuormituksissa. Myös tavaraliikenteen osalta muutokset ovat suurimmat 2008–2009 välillä.

5 MONITOROINNIN HAVAINNOT JA PAINUMIEN RIIPPUVUUS ERI TEKIJÖISTÄ

5.1 Routiminen ja sulamispainumahavainnot

Seuraavassa on esitetty routanousu- ja painumahavainnot niiltä vuosilta, joilta tarkastelukelpoista mittausdataa on ollut saatavilla. Kuvaajissa on esitetty myös routaantumisen ja sulamisen eteneminen sekä rakennekerrosten paksuus ja mahdollisen routalevyn korkeusasema rakenteessa. Monitoroitavan ratapölkyn molempien päiden liikkeet ja routarajan eteneminen maassa on esitetty samalla värillä vuosikohtaisesti. Kuvaajien y-akselin nollakohta on asetettu tasoon, josta routanousu on lähtenyt tarkastelutalvena syntymään. Tämän tason alapuolelle syntyvää painumaa kutsutaan jatkossa sulamispainumaksi.

Karkun kohteesta on esimerkinomaisesti esitetty koko vuoden kattava kuva 5.1, josta voidaan nähdä ratapölkyn päiden siirtymät läpi vuoden. Painumisnopeutta ja sen muuttumista on käsitelty tarkemmin luvussa 5.2.



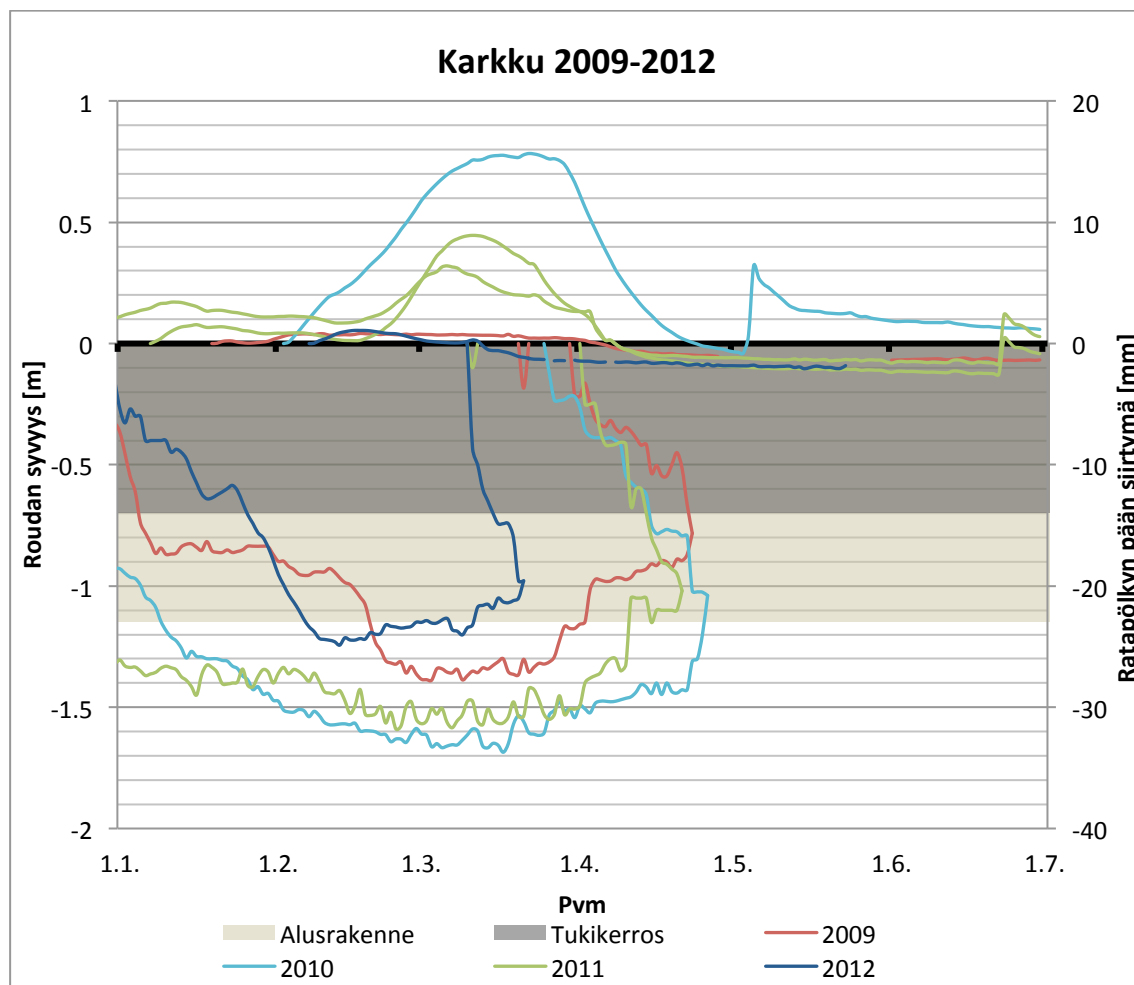
Kuva 5.1. Karkun kohteen ratapölkyn pään siirtymät ja rakenteen routaantuminen 2008–2012.

Muiden kohteiden sulan kauden aikainen käyttäytyminen ei poikkea periaatteeltaan kuvan 5.1 tilanteesta. Sulamisen aikaan keskittymiseksi kuvaajissa 5.2–5.13 on esitetty ensimmäisen vuosipuoliskon havainnot. Kohdekohtaisia eroja esiintyy sulana aikana ratapölkyn päiden painumisnopeudessa ja talvikohtaisessa routanousujen vaihteluissa. Paikoin myös raiteen tukeminen muuttaa normaalia painumiskäyttäytymistä kunnes sepeli saavuttaa uutta tukeutumistilannetta ja liikennekuormitusta vastaavan tiiviyyden.

Karkku

Pääasiallinen routanousu aiheutuu Karkussa kuvan 5.2 perusteella routaantumisen etenemisestä pohjamaahan asti kaikkina tarkastelujaksoina. Tämän perusteella alusrakennemateriaali ei ole routivaa, mitä tukee myös alusrakennenyhteistä määritetty rakeisuus. Routanousun suuruus korreloi näin ollen kuvan perusteella kohtuullisen hyvin roudan tunkeutumissyvyyden kanssa. Ankarimpana talvena 2010 nousua kehittyi

selvästi muita vertailutalvia enemmän, vaikka roudan tunkeutumissyvyys ei ollut merkittävästi näitä suurempi.



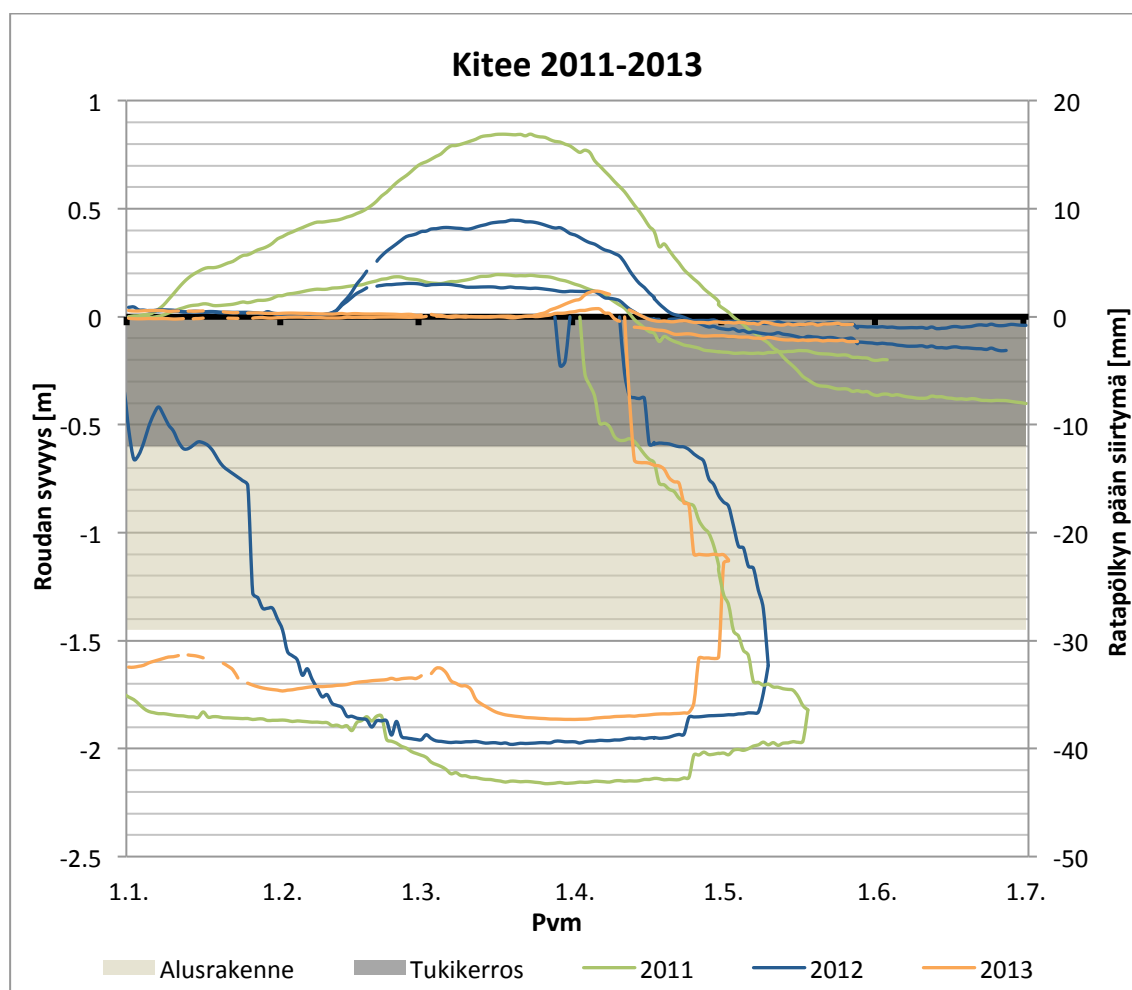
Kuva 5.2. Karkun routanousu- ja sulamispainumahavainnot 2009–2012.

Sulamispainumaa esiintyy Karkussa kaikkina keväinä ja painuman suuruudessa ei ole keväiden välillä suuria vaihteluita kuten routanousuissa. Sulamispainumat muodostuvat melko tarkasti samansuuruisiksi kaikkina keväinä riippumatta routanousun suuruudesta. Sulaminen alhaaltapäin voi käynnistää routanousun tasaantumisen ennen kuin pintasulamien alkaa edetä. Painuminen tasaantuu nopeasti tietyn hetken jälkeen saavuttaen kesäajalle tyypillisen kulmakertoimen. Keväällä 2010 ja kesällä 2011 esiintyvät hyppäykset ovat raiteen tukemisesta johtuvia ratapölkyn korkeusaseman muutoksia. Tukemisen jälkeen voidaan havaita raideseppelin tiivistymisestä johtuva hetkellinen jyrkkä painuminen, joka kuitenkin tasaantuu nopeasti vastaamaan normaalia sulan ajan tahtia.

Kitee

Kiteellä routanousut alkavat kehittyä kuvan 5.3 mukaisesti roudan päästyä tunkeutumaan pohjamaan puolelle. Toteutuneissa routanousuissa on talvina 2011 ja 2012

huomattavan suuret erot pölkyn päiden välillä, mikä viittaa jäälínssin muodostumisen voimakkaaseen paikallisuuteen. Viimeisenä tarkastelutalvena 2013 routaraja ei ole saavuttanut routivaa pohjamaakerrosta kunnolla, koska routanousut ovat jääneet hyvin maltillisiksi aiempiin vuosiin verrattuna. Routaraja on tänäkin tarkastelujaksona viipynyt pitkään pohjamaassa, mutta se ei ole edennyt kahden edellisen tarkastelujakson tasoon saakka. Routanousun suuruus näyttää korreloivan pääpiirteittäin roudan tunkeutumisvyöhykkeen kanssa.

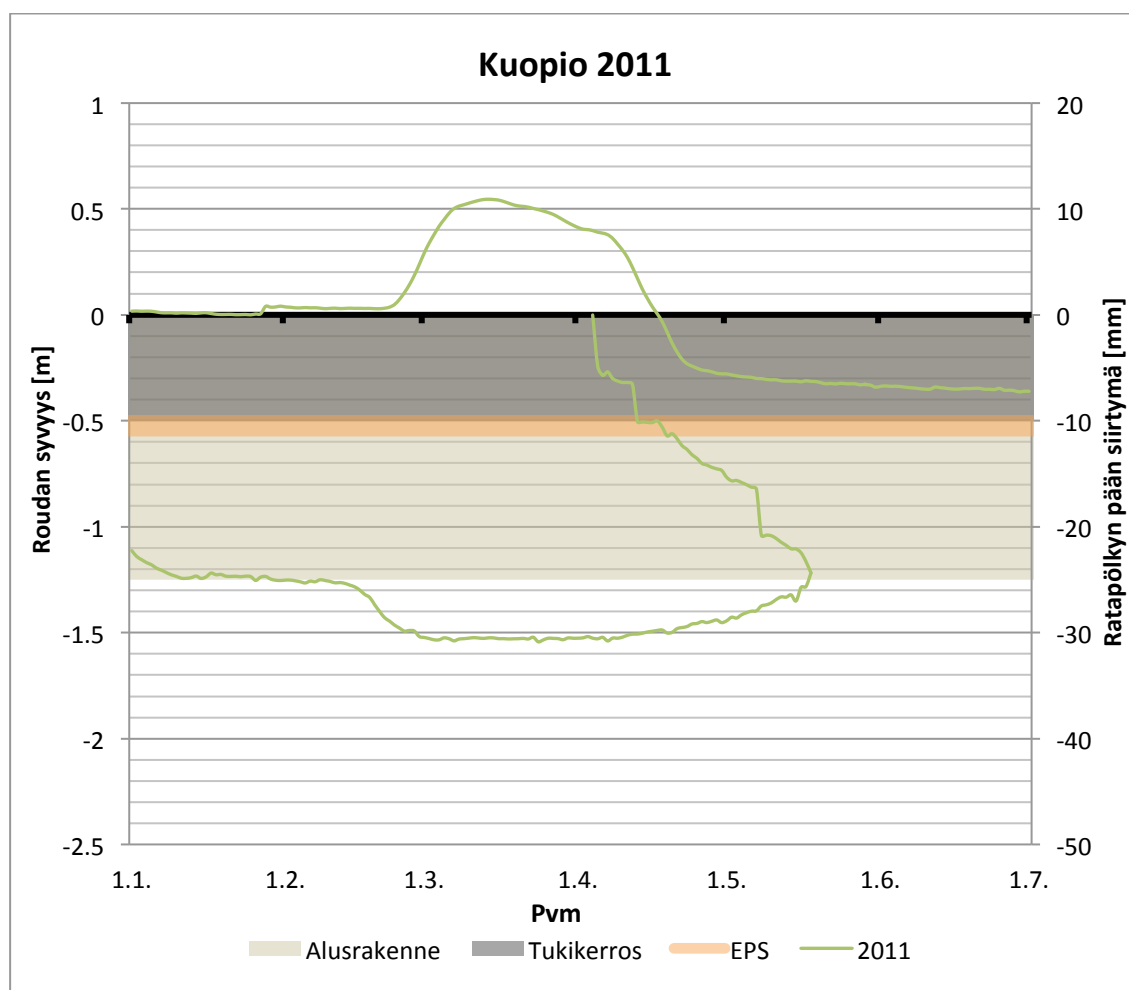


Kuva 5.3. Kiteen routanousu- ja sulamispainumahavainnot 2011–2013.

Routanousun tasaantuminen alkaa kaikkina keväinä, kun sulaminen lähtee hienoisesti etenemään rakenteen alapuolelta ja kiihtyy selvästi sulamisen alettua pinnasta. Routanousujen suuruus näyttää löyhästi korreloivan keskimääräisen sulamispainumisen suuruuden kanssa. Kevään 2013 sulamispainumat ovat kuitenkin samaa suuruusluokkaa kevään 2012 kanssa, vaikka routanousut ovat jääneet huomattavasti pienemmiksi. Keväiden 2011 ja 2012 kohdalla voidaan siirtymäkuvaajista havaita painumisen nopean hidastumisen jälkeen sen kuitenkin jatkuvan jyrkemmällä kulmakertoimella kuin keväällä 2013.

Kuopio

Kuopion kohteesta kelpollista dataa on vain vuodelta 2011 yhden siirtymäanturin osalta, joka on esitetty kuvassa 5.4 Kohde on purettu vuonna 2012, joten monitorointiaika kesti kohteella kaksi talvea. Routaraja on pysynyt pitkään alusrakenteen alaosassa, minkä jälkeen routanousua on alkanut syntymään vasta roudan tunkeuduttua pohjamaahan. Routalevy sijaitsee kohteessa nykyohjeiden mukaisesti tukikerroksen alapuolella, mutta on materiaaliltaan epäkelvoksi todettua EPS:ää.

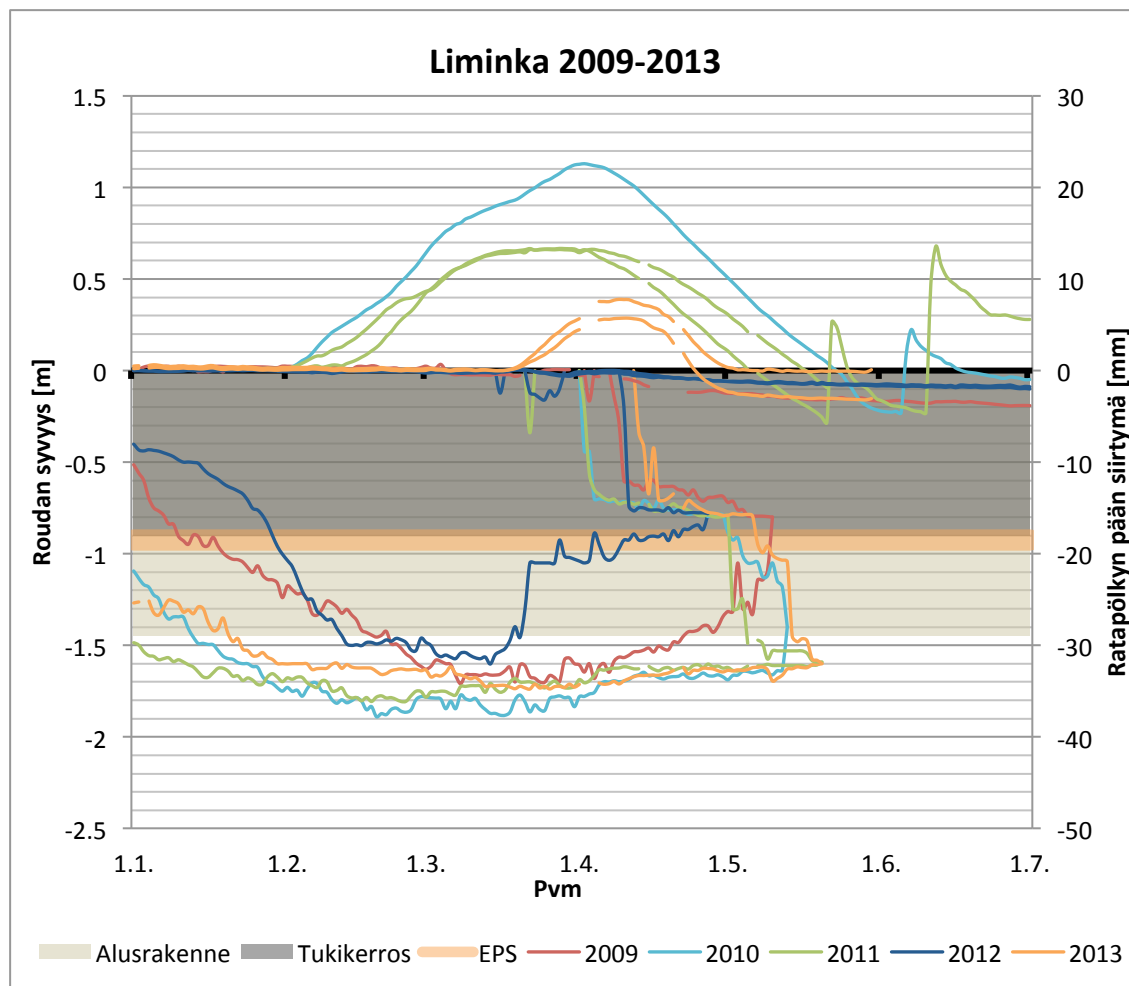


Kuva 5.4. Kuopion routanousu- ja sulamispainumahavainnot 2011.

Rakenteen alapuolinen sulaminen alkaa tasata routanousua ennen pintasulamista. Tukikerroksen alettua sulaa painuminen kiihtyy äkisti, mutta tasaantuu nopeasti sulamisen edettyä alusrakenteen puolelle. Huomionarvoista on, että alusrakenne pysyy jäässä vielä lähes kuukauden sen jälkeen, kun sulamispainuminen on ohittanut sille tyypillisen taitepisteen ja alkanut tasaantua kohti normaalia sulanajan nopeuttaan. Routalevyn käänteinen, maata jäässä pitävä, vaikutus on tässä kohteessa selvästi havaittavissa.

Liminka

Limingan kohteessa routanousun aiheuttava kerros alkaa noin 0,2 metriä alusrakenteen alapuolella kuvan 5.5 perusteella. Roudan tunkeutumissyvyys näyttää tässäkin korreloivan syntyneiden routanousujen kanssa. Talvina 2009 ja 2012, jolloin routautuminen ei saavuttanut routivaa kerrosta, ei routanousuja syntynyt käytännössä lainkaan.

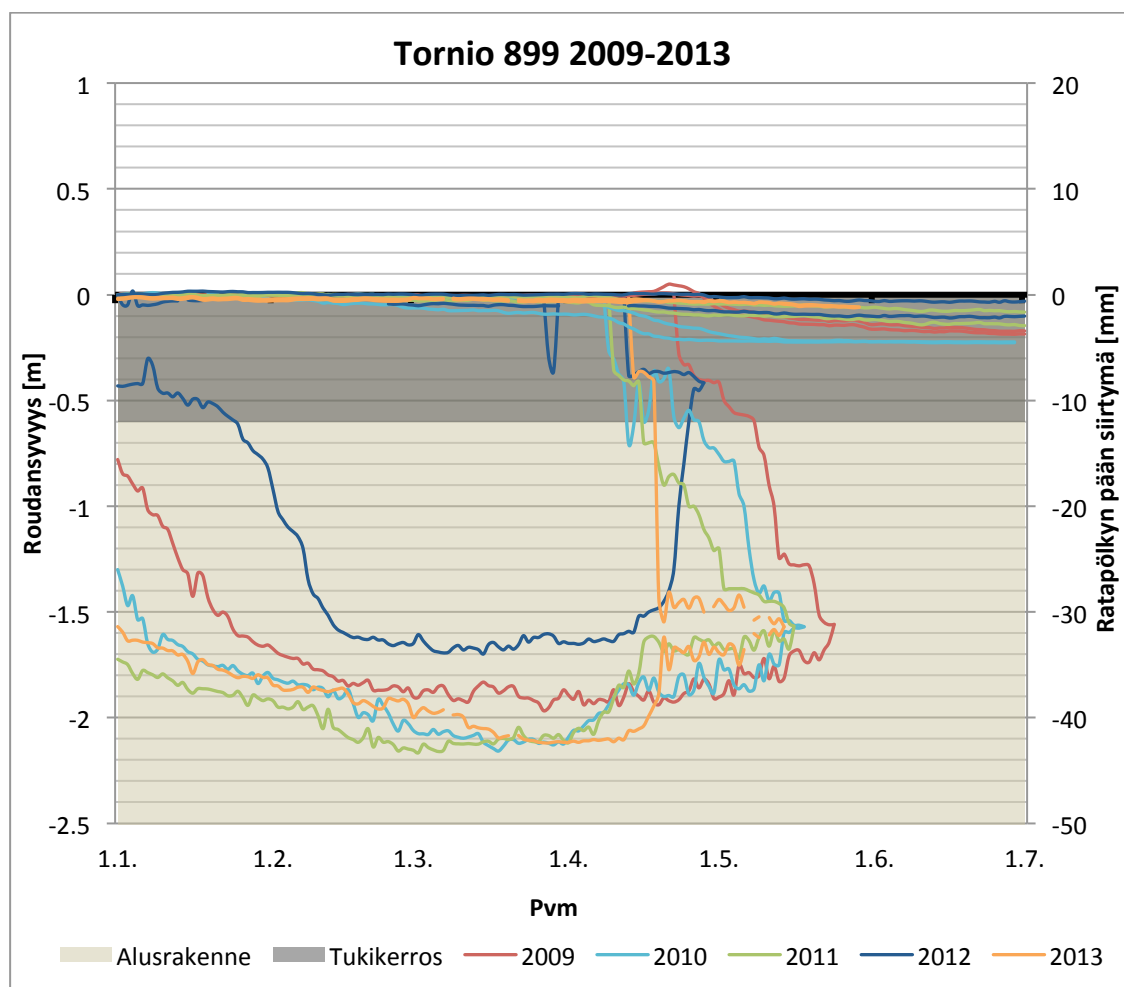


Kuva 5.5. Limingan routanousu- ja sulamispainumahavainnot 2008–2013.

Sulamispainumat lähtevät kehittymään voimakkaasti tukikerroksen alettua sulaa, vaikka pohjamaan sulaminen on alkanut hienoisesti etenemään jo ennen tätä. Routeristeen vaikutus näkyy 2–3 viikkoa kestäväenä hidastuneena sulamisena. Tukikerroksen jääpitoisuus on ollut ilmeisen matala kaikkina tarkastelutalvina, koska sulaminen on ollut hyvin äkillistä. Huomattavaa on, että myös talvina jolloin routanousua ei syntynyt käytännössä lainkaan, kehittyi sulamispainumaa noin 1–2 mm. Painuman syntyessä tukikerroksen alaosa ja alusrakenne olivat vielä osittain jäässä. Talvien 2010 ja 2011 lopullisten sulamispainumatasojen toteaminen ei ole mahdollista tukemisten aiheuttamien epäjatkuvuuksien takia. Keväällä 2013 ratapölkyn toinen pää palasi poikkeuksellisesti routanousun lähtöhetken korkeusasemaan, vaikka toiseen päähän syntyi tyypillinen sulamisenjälkeinen painuma.

Tornio 899

Kohteessa Tornio 899 ei ole syntynyt routanousuja käytännössä lainkaan yhtenäkkään tarkastelutalvena kuvan 5.6 mukaisesti. Ainoastaan talvena 2009 pölkyn toisesta päästä on havaittavissa pientä nousua, mutta havainto johtuu todennäköisesti jostain muusta tekijästä kuin jäälínssin muodostumisen aiheuttamasta routimisesta, koska nousu ajoittuu pintasulamisen alkamishetkeen. Kohteen rakennekerrokset ovat poikkeuksellisesti nykyohjeiden mukaisesti riittävän paksut, eikä routa ole päässyt näin ollen tunkeutumaan kertaakaan pohjamaahan asti.



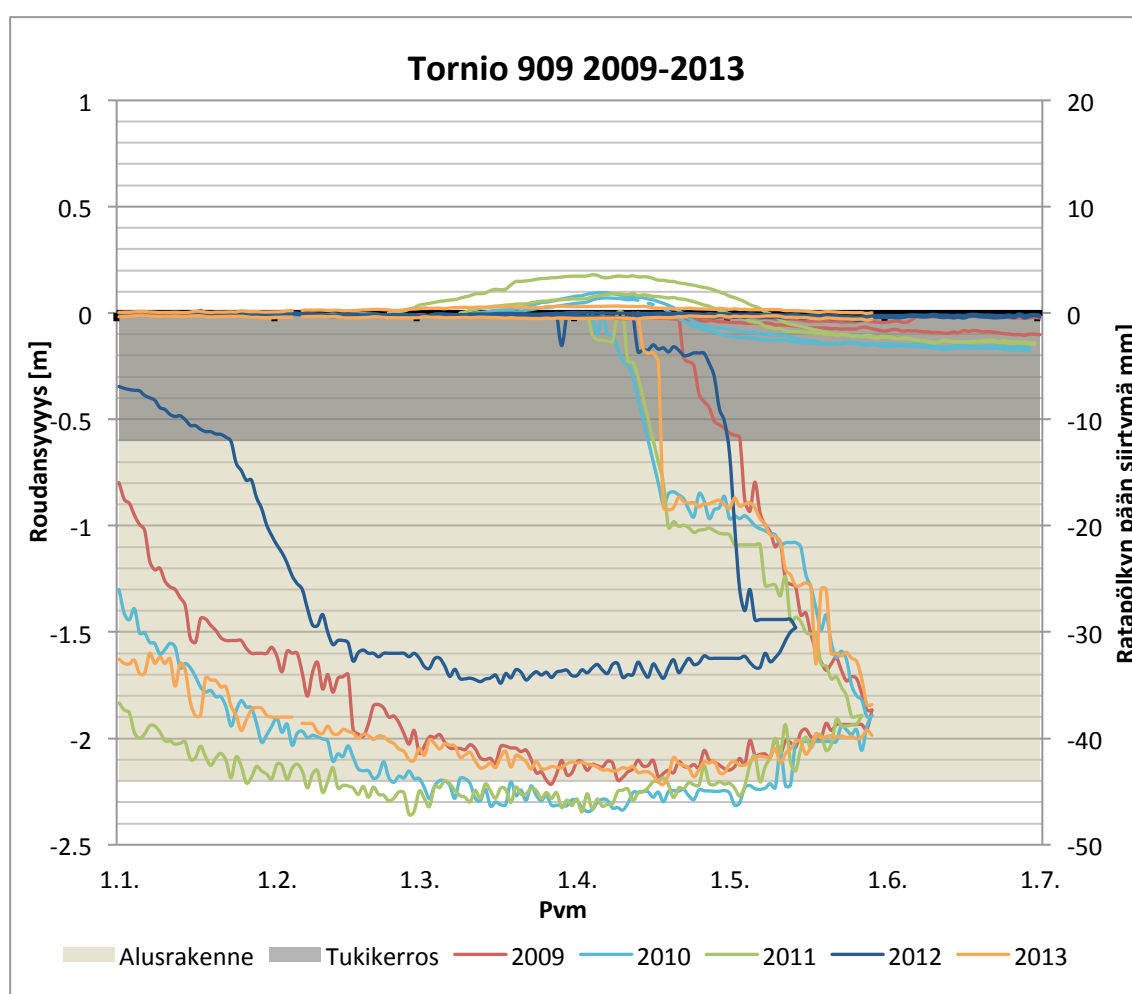
Kuva 5.6. Kohteen Tornio 899 routanousu- ja sulamispainumahavainnot 2008–2013.

Poislukien talvi 2009, ratapölkky on jatkanut painumistaan läpi talven, mikä viittaisi tukikerroksen vähäiseen jääpitoisuuteen ja tätä kautta sepelin heikkoon sitoutumiseen pakkaskauden aikana. Talviaikaisen painumisen nopeus vaihtelee vuosittain, mutta ilmiö on selvästi havaittavissa kaikkina tarkastelujaksoina. Painuminen kiihtyy erityisesti keväällä 2010 tukikerroksen sulamisen aikana, mutta tasoittuu noin 1–2 viikon kuluessa. Muina keväinä tällaista selkeästi jyrkempää ja routineille kohteille tyypillistä painumisjaksoa ei ole havaittavissa. Kohteen perusteella voidaan todeta painumista

tapahtuvan keväisin routimisesta riippumatta, joskin sen suuruus ja nopeus poikkeavat huomattavasti routineista kohteista.

Tornio 909

Kohteessa Tornio 909 routanousuja esiintyi talvina 2010 ja 2011 jolloin routa pääsi tunkeutumaan pohjamaahan asti kuvan 5.7 mukaisesti. Talvina 2009, 2012 ja 2013 routimista ei tapahtunut juuri lainkaan, vaan pölkyn asema pysyi lähes muuttumattomana. Talven 2011 routiminen oli jonkin verran suurempaa johtuen todennäköisesti routarajan viipymisestä pidempään pohjamaan puolella. Routanousut ratapölkyn eri päissä poikkiesi molempina talvina jonkin verran toisistaan, mikä viittaa pohjamaan epätasalaatuisuuteen penkereen kohdalla.



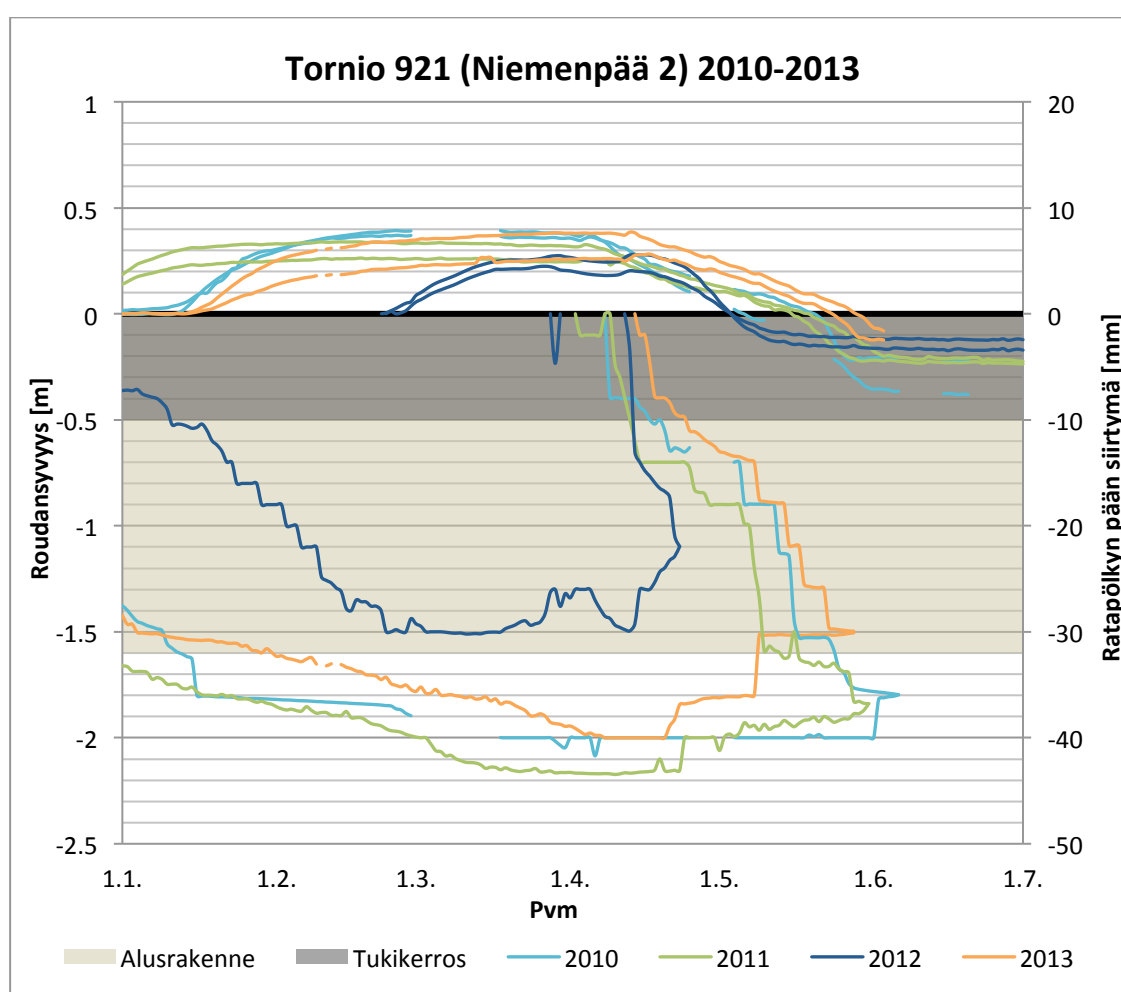
Kuva 5.7. Kohteen Tornio 909 routanousu- ja sulamispainumahavainnot 2009–2013.

Molempien routanousuja synnyttäneen talven jälkeen sulamispainuma lähtee kehittymään tukikerroksen alkaessa sulaa. Routimattomien talvien jälkeen keväinä 2012 ja 2013 ratapölkyn asema ei juuri ole muuttunut sulamisen jälkeen, mutta keväällä 2009 sulamispainuma on havaittavissa vastaavalla tavalla kuin kohteessa 899. Routimattomien talvien jälkeen selvää sulamispainuman kiihtymistä on havaittavissa vain kevääl-

lä 2009. Routanousutalvien jälkeen sulamispainumisen vauhti alkaa tasoittua jo ennen alusrakenteen täydellistä sulamista. Sulamispainuman suuruus ei tässä kohteessa korreloi syntyneen routanousun kanssa.

Tornio 921

Kohteessa Tornio 921 routanousuja esiintyy kaikkina tarkastelutalvina kuvan 5.8 mukaisesti. Kohteen eristyskerroksen alaosan materiaali on routivaa, koska talvella 2012 routaraja ei ole ulottunut pohjamaan puolelle, mutta merkittävää routanousua on kuitenkin syntynyt. Alusrakenteen alaosan korkea, noin 13 prosentin, hienoainespitoisuus selittäisi tätä havaintoa. Roudan maksimi tunkeutumissyvyys ei näytä täysin korreloivan toteutuneiden routanousujen kanssa, vaan routarajan pysähtyminen tietyllä syvyydelle mahdollistaa nousujen syntymisen.



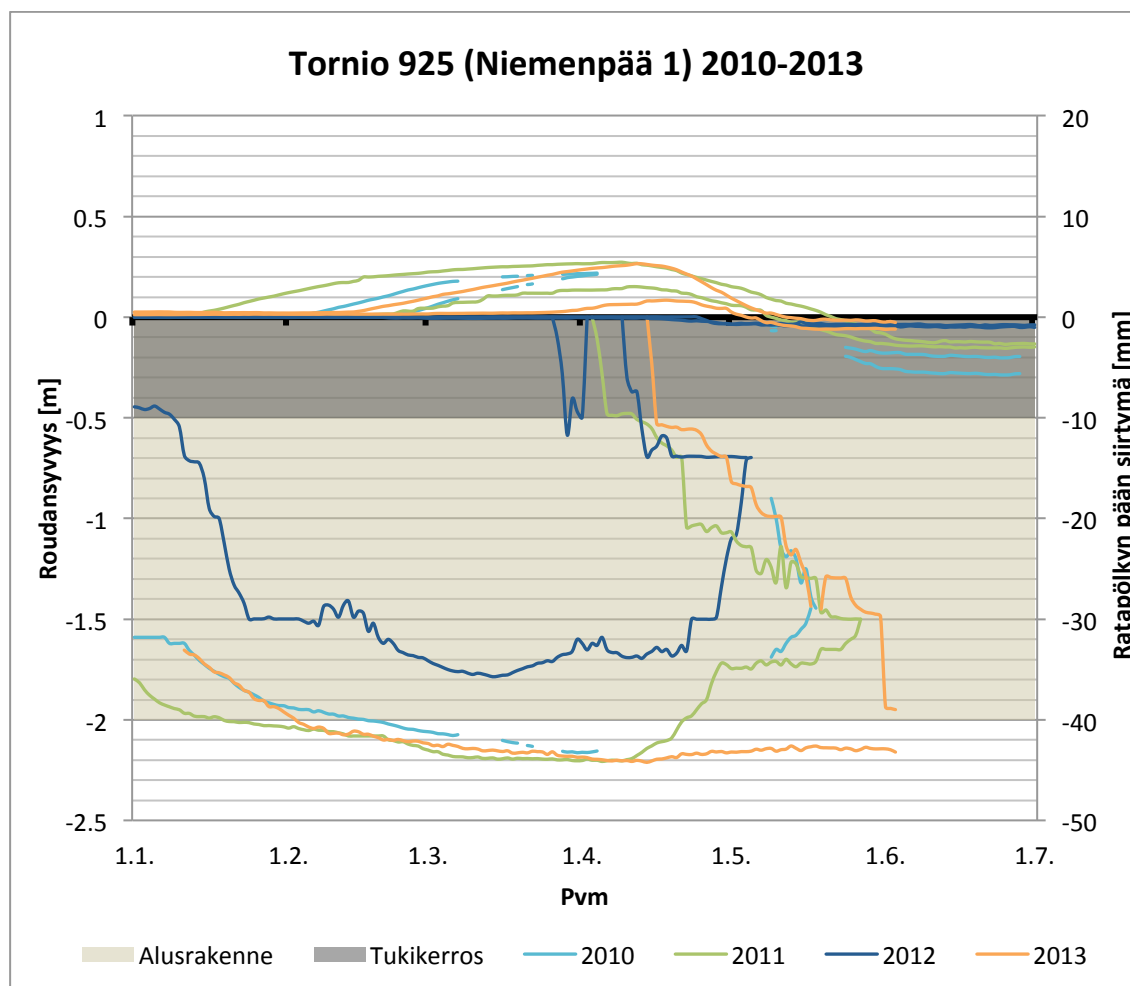
Kuva 5.8. Kohteen Tornio 921 routanousu- ja sulamispainumahavainnot 2010–2013.

Painuminen on alkanut jokaisena keväänä pintasulamisen kanssa samaan aikaan. Keväällä 2012 pientä nousua on havaittavissa vielä pintasulamisen alkamisen jälkeen johtuen ilmeisesti tätä edeltäneestä routarajan lyhytaikaisesta painumisesta syvemmälle. Keväällä 2010 ja 2011 painuminen tasaantuu samoihin aikoihin roudan sulamisen

loppuessa pohjamaan puolella. Pölkkyjen päiden sulamispainuma on keväällä 2010 jokseenkin erisuuruista, vaikka routanousut ovat lähes yhtä suuret. Talvien 2010 ja 2011 perusteella syntyneen routanousun ja sulamispainuman suuruuden välillä voidaan havaita positiivinen korrelaatio. Kevään 2013 sulamispainumat näyttäisivät jäävän aiempia vuosia pienemmiksi, vaikka routanousut ovatkin vertailuvuosien suuruusluokkaa. Tosin routa ei ole keskimäärin tunkeutunut vertailuvuosien syvyyteen.

Tornio 925

Kohteessa Tornio 925 routanousujen syntyminen on edellyttänyt roudan tunkeutumista pohjamaahan kuvan 5.9 mukaisesti. Talven 2012 havaintojen perusteella alusrakennemateriaali ei ole routivaa, koska routanousuja ei syntynyt käytännössä lainkaan. Tukikerros on ollut ilmeisen tiiviisti jäätynyt, koska ratapölkystä ei voi havaita juuri minkäänlaista liikettä kyseisen talven aikana. Talvella 2011 routaraja viipyi pisimpään pohjamaan puolella, jolloin syntyivät myös tarkastelujaksojen suurimmat routanousut. Tässäkin kohteessa ratapölkyn eri päissä routanousun suuruus on vaihdellut selvästi.

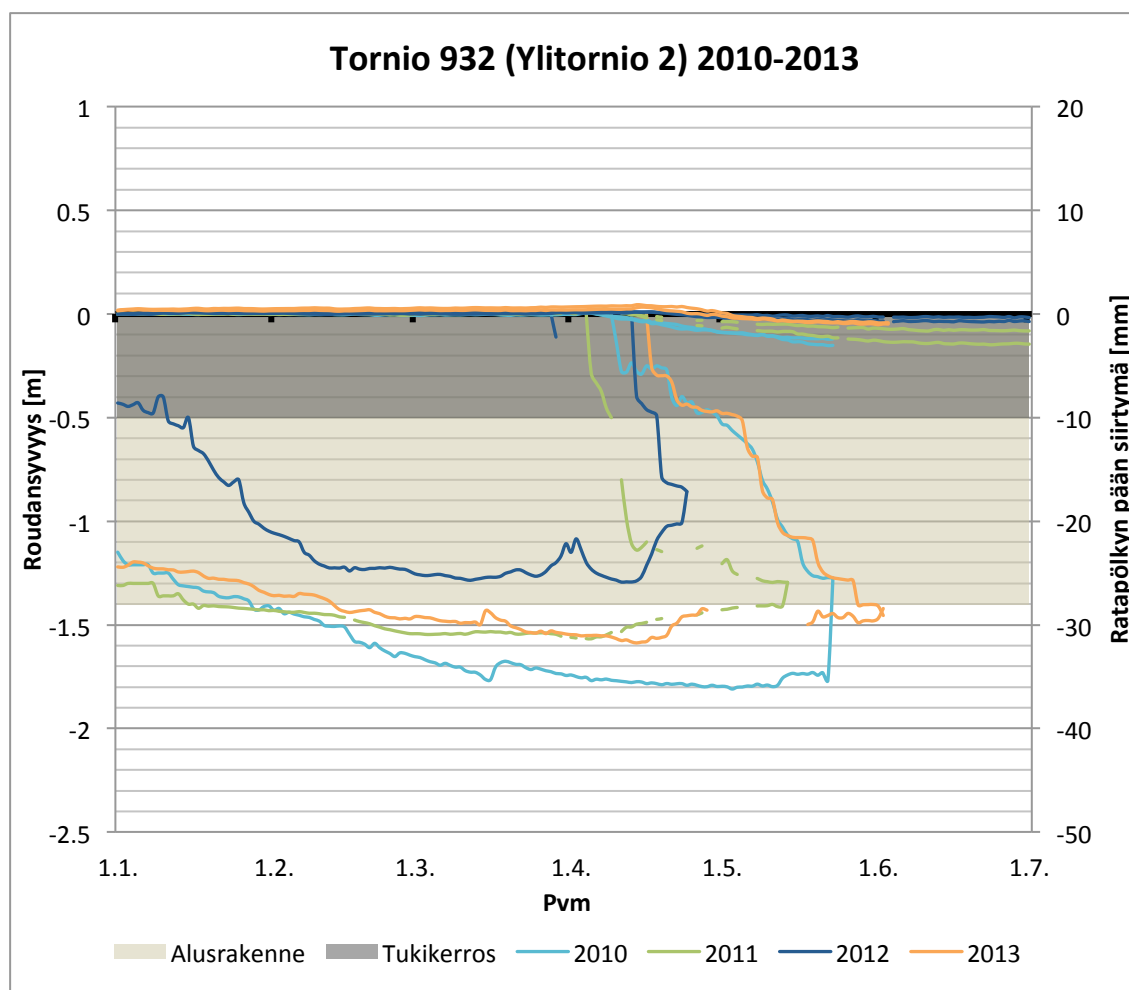


Kuva 5.9. Kohteen Tornio 925 routanousu- ja sulamispainumahavainnot 2010–2013.

Talven 2010 mittausdatan puutteellisuuden takia sulamisen ja painumisen alkamisesta ei saa täydellistä kuvaa. Keväällä 2011 painuminen alkaa pohjamaan alkaessa sulaa, vaikka tukikerros on sulanut suhteellisen nopeasti jo tätä ennen. Kevään 2010 sulamispainuma kehittyi kevättä 2011 suuremmaksi, vaikka routanousu on jäänyt hieman edeltävää talvea pienemmäksi. Katkenneen mittauksen takia painumisen alkuhetkeä ei ole mahdollista havaita. Keväällä 2012 painumaa syntyy routimattomalle tilanteelle tyypilliseen tapaan vain parin millimetrin verran. Tässäkin pieni sulamispainuma enteilee hidasta kesäaikaista painumista, koska pölkyn asema pysyy hyvin stabiilina kesään 2012 tultaessa. Tässä kohteessa syntyneet routanousut ja sulamispainumat eivät juuri korreloi keskenään.

Tornio 932

Kohteessa Tornio 932 routa on päässyt tunkeutumaan kuvan 5.10 mukaisesti pohjamaan puolelle vuosina 2010–2013 lukuun ottamatta talvea 2012. Tämän perusteella voidaan todeta pohjamaan olevan routimatonta, koska selviä jäälinssin muodostuksista johtuvia routanousuja ei ole syntynyt. Tukikerros on pysynyt tasaisesti jäässä läpi talven kaikkina tarkastelutalvina, koska siirtymiä ei talvikausina ole juurikaan havaittavissa. Talven 2013 aikana pientä nousua esiintyy vähän vasta keväällä ennen sulamisen alkamista, mikä saattaa johtua in-situ routimisesta rakennekerrosten alapuolella.



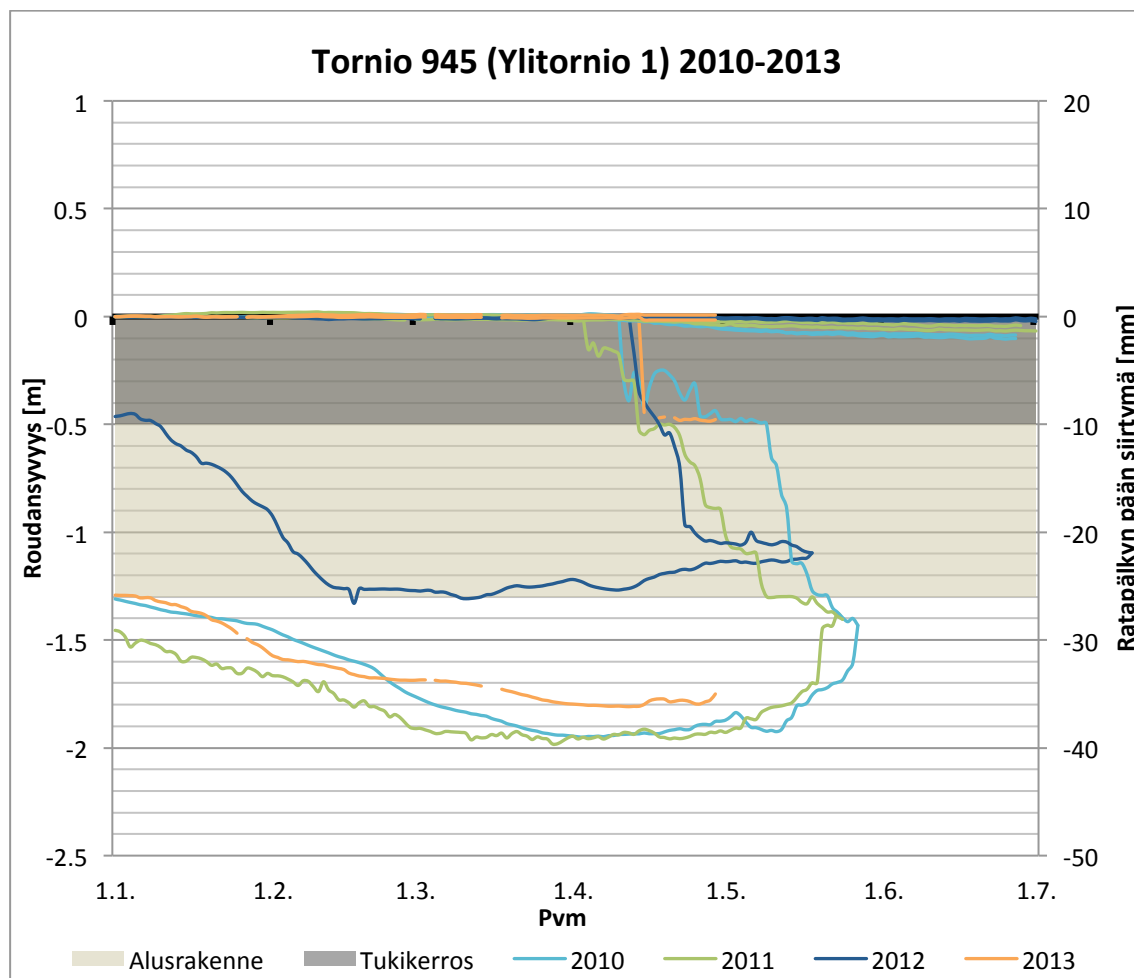
Kuva 5.10. Kohteen Tornio 932 routanousu- ja sulamispainumahavainnot 2010–2013.

Sulamispainumista esiintyy kaikkina keväinä ja painuman suuruus näyttää korreloivan ainakin osittain positiivisesti routautumissyvyyden kanssa. Siirtymäkuvaajan muoto on keväisin samanlainen muiden routimattomien kohteiden kanssa, eikä siitä voida havaita selkeää painumanopeuden tasaantumishetkeä, vaan kesää kohti painuminen tasoittuu jouhevasti. Kevät 2011 poikkeaa kahdesta muusta ratapolkyn päiden selkeämmin eritahtisen painumisen osalta. Tornion kohteiden pieni liikennemäärä saattaa osaltaan vaikuttaa painumakuvaajien jokseenkin loivempaan muotoon eteläisiin kohteisiin nähden, koska sulamispainumisen tasaantuminen tapahtuu melko jouhevasti sekä routineissa että routimattomissa kohteissa. Painuminen on alkanut pintasulamisen kanssa samaan aikaan ja suurin osa painumisesta on tapahtunut tukikerroksen sulamisen aikana.

Tornio 945

Kohteessa Tornio 945 routanousuja ei kuvan 5.11 mukaisesti ole syntynyt, vaikka routa on talvina 2010 ja 2011 tunkeutunut reilusti pohjamaan puolelle. Talvella 2011 on havaittavissa hienoista nousua, joka on kuitenkin siinä määrin pientä, että kyseessä on todennäköisesti in-situ routiminen varsinaisen routalinssin muodostumisen sijaan.

Tukikerros on pysynyt pakkaskaudet ilmeisen tiiviisti jäässä, koska ratapölkystä ei ole juurikaan siirtymiä havaittavissa yhtenäkkään tarkastelujaksona.



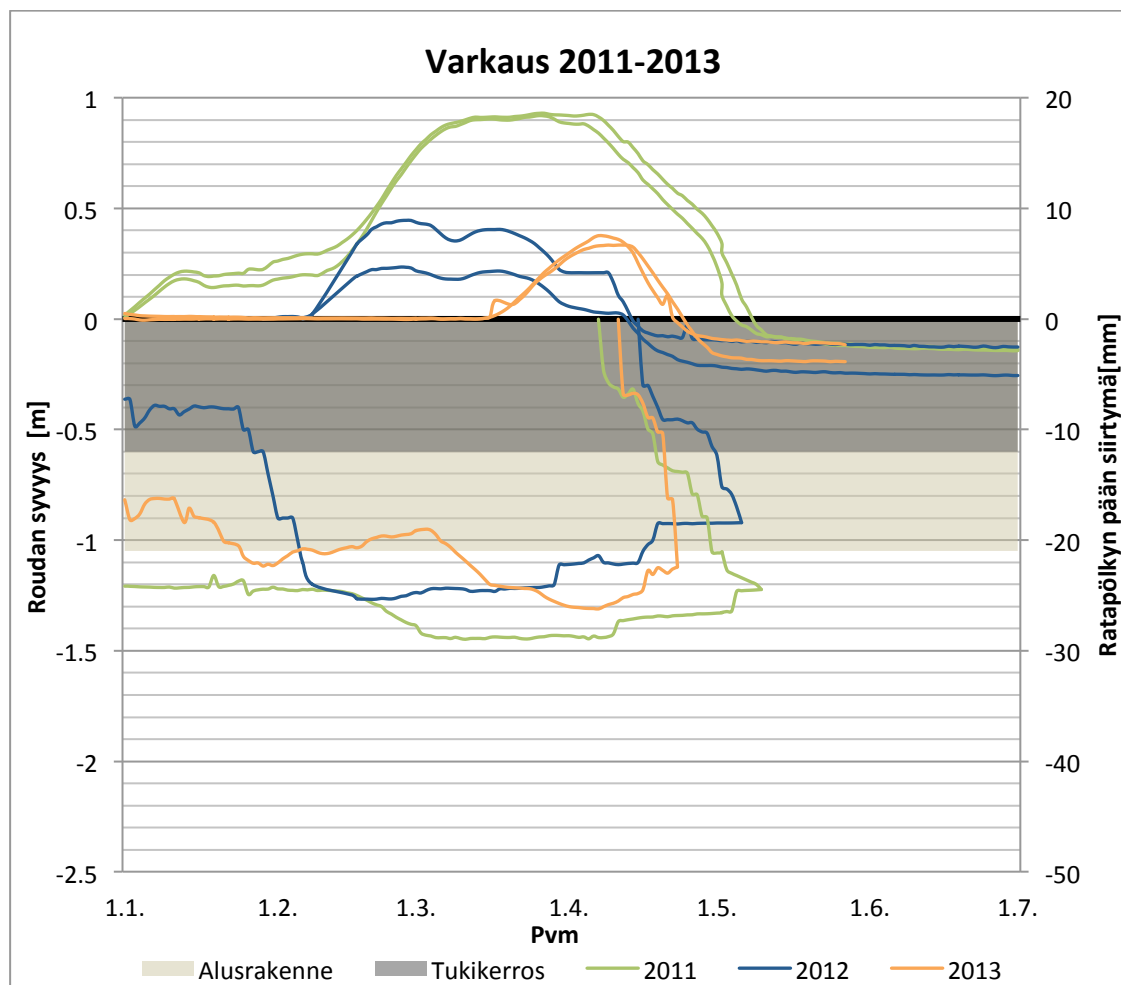
Kuva 5.11. Kohteen Tornio 945 routanousu- ja sulamispainumahavainnot 2010–2013.

Sulamispainumaa esiintyy pienessä määrin routimattomalle kohteelle tyypilliseen tapaan tässäkin kohteessa kaikkina tarkastelutalvina. Roudan tunkeutumissyvyys korreloi jossain määrin syntyneiden painumien kanssa. Keväällä 2010 sulaminen on kestänyt tarkastelujaksoista pisimmälle kevääseen ja tällöin myös painumaa on muodostunut eniten. Syntyneiden painumien suuruuserot ovat myös hyvin pieniä routineisiin kohteisiin nähden. Painumat ovat syntyneet pääosin tukikerroksen sulamisen aikana.

Varkaus

Varkauden kohteessa routa on edennyt pohjamaahan jokaisena tarkastelutalvena kuvan 5.12 mukaisesti, mistä on seurannut selvät jäälínssin muodostuksesta johtuvat routanousut. Routanousujen suuruudet korreloivat selvästi roudan tunkeutumissyvyyden kanssa. Keväällä 2013 routa on lähtenyt hetkellisesti sulamaan jo helmikuun alussa, mutta sulaminen on pysähtynyt kylmemmän jakson seurauksena ja routanousua on syntynyt vielä uudestaan. Erot routanousujen suuruuksissa eivät korreloi roudan tun-

keutumissyvyyden kanssa, mutta talvella 2011 routaraja on pysytellyt pisimpään pohjamaan puolella, mikä voi osaltaan selittää suurehkoja routanousuja.



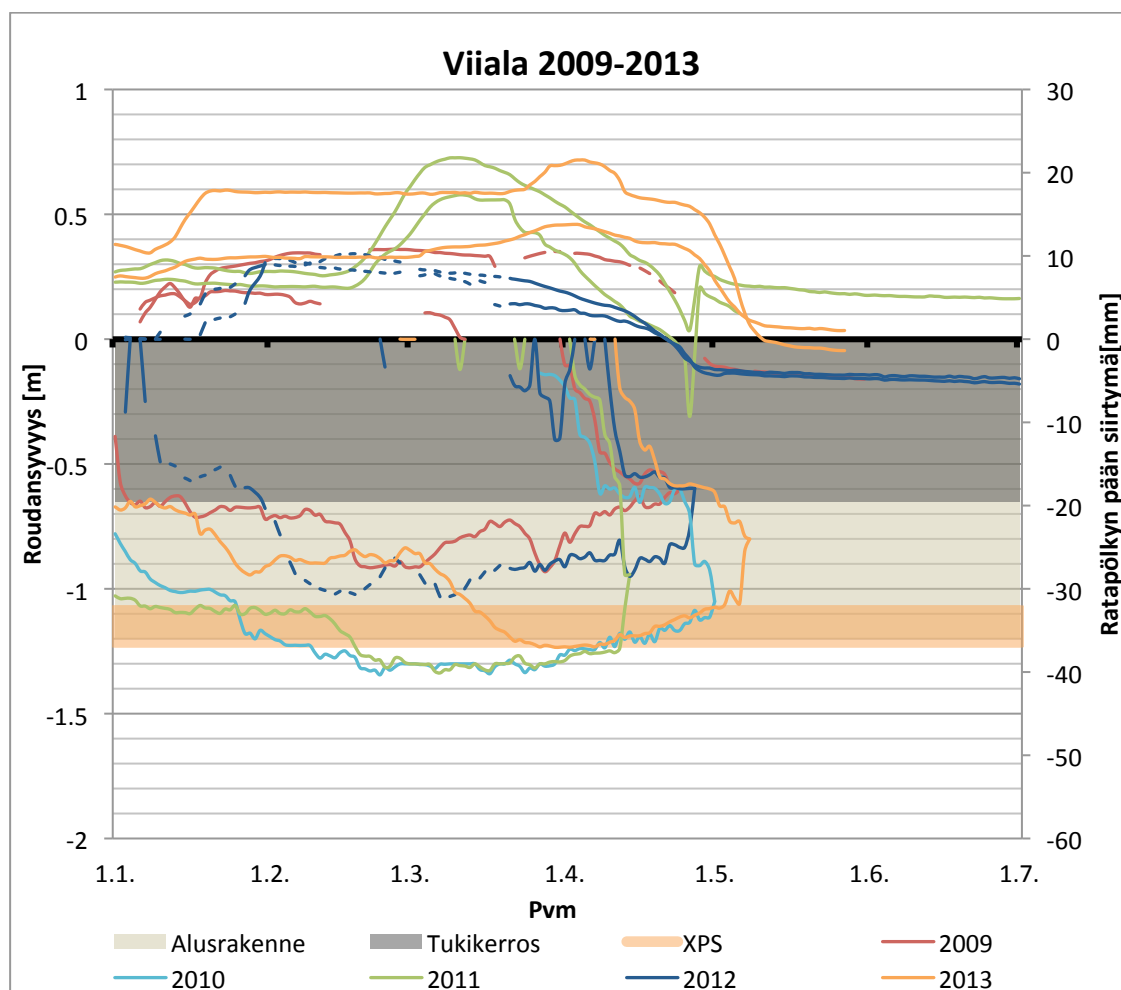
Kuva 5.12. Varkauden routanousu- ja sulamispainumahavainnot 2011–2013.

Sulaminen alkaa keväällä 2011 edetä yhtäaikaaisesti sekä ylä- että alapuolelta rakennetta, jolloin myös painuminen lähtee etenemään. Keväällä 2012 painuminen alkaa routan alapuolisen sulamisen johdosta ennen pintasulamista. Tässä kohteessa routanousun suuruus ei korreloi syntyneiden sulamispainumien kanssa. Keväällä 2011 painuminen on ollut tasaista ratapolkyn molemmissa päissä kuten routanousunkin suuruus. Keväiden 2012 ja 2013 tilanteet muistuttavat pitkälti toisiaan sekä routanousujen että sulamispainumien osalta. Kevään 2013 routanousujen kesto jäi noin kuukauden kevättä 2012 lyhyemmäksi.

Viiala

Viialan kohteessa selkeitä routanousuja esiintyy kaikkina tarkastelutalvina. Kuvasta 5.13 nähdään, että nykyohjeiden näkökulmasta virheellisesti pohjamaan päälle asennettu routalevy viivyyttää routaantumisen etenemistä, mutta ei tässäkään kohteessa estä täysin pohjamaan jäätymistä. Limingan ja Kuopion kohteista poiketen routalevyn ma-

teriali on myöhemmin käyttöönotettua XPS:ää, mutta levyn poikkeavalle asennustasolle ei ole ilmennyt perusteltua syytä. Syntyneet routanousut korreloivat jossain määrin roudan tunkeutumisvyvyyden kanssa. Kohteessa on myös poikkeuksellisen suhteistuneesta materiaalista rakennettu alusrakenne, jonka muita kohteita suurempi hienoainespitoisuus selittää alusrakenteen aiheuttamia routanousuja. Talven 2010 osalta routanousuhavaintojen riippuvuutta routarajan etenemisestä ei ole mahdollista tarkastella, koska siirtymämittauksessa ollut katko ei mahdollistanut routanousun lähtötason määrittämistä.



Kuva 5.13. Viialan routanousu- ja sulamispainumahavainnot 2009–2013.

Sulamispainumia on kohteessa syntynyt kaikkina keväinä, ja painumakuvaajista on havaittavissa vastaavanlainen tasaantumista edeltävä taitepiste kuin muistakin routimisen jälkeisistä painumakuvaajista. Erityisen suuria ja nopeita painumia on havaittavissa keväällä 2011, jota edeltävänä talvena routa tunkeutui pohjamaahan asti. Tässä raiteen tukeminen on aiheuttanut epäjatkuvuuden, jonka takia painuman luonnollisesta lopputasosta ei ole saatu havaintoa. Painuminen oli erityisen nopeaa myös keväällä 2010, mutta alkutalven mittauskatkon takia routanousun lähtötasoa ja näin ollen painuman lopputasoa ei ole voinut määrittää, joten siirtymäkuvaaja on jätetty esittämättä.

Painumisen on pääsääntöisesti aloittanut sulaminen rakenteen alapuolelta ja routanousukohteille tyypillinen taitepiste ajoittuu rakenteen täydellisen sulamisen jälkeiseen aikaan. Syynä muihin kohteisiin nähden poikkeuksellisen jyrkkiin painumiin saattaa olla se, että välittömästi routalevyn alapuolelle muodostuneesta jäälinssistä vapautuva vesi ei pääse purkautumaan virheellisesti asennetun routalevyn takia ylöspäin. Näin ollen paikalleen jäänyt vesi aiheuttaa erityistä lujuuskatoa pohjamaahan routalevyn alapuolella talvina, jolloin pohjamaa on päässyt jäätymään.

5.2 Yhteenveto rakenteista ja niiden havaitusta käyttäytymisestä

Taulukossa 5.1 on arvioitu sanallisesti kuinka sulamispainuma riippuu kohteen kaikkien tarkastelutalvien keskiarvona routanousuista ja roudan syvyydestä. Tämän lisäksi sulamispainumien syntymisajankohtaa on havainnointu suhteessa tukikerroksen ja alusrakenteen sulamiseen samalla keskimääräistyksellä. Kuopion kohteesta ei vertailuvuosien puuttuessa ollut mahdollista tarkastella riippuvuuksia.

Tukikerroksen hienontumisesta on esitetty sanallinen arvio, koska luvussa 4 esitetyistä syistä johtuen vertailukelpoisten rakeisuuslukujen laskeminen ei ollut kaikista kohteista mahdollista. Tornion kohteiden tukikerrosten vertailua eteläisiin hankaloittaa se, että näytteet on otettu vanhan tukikerroksen alaosaan ja uusimistyön jälkeen yläosa koostuu uudesta materiaalista. Alusrakennemateriaalien osalta on kerätty havainnot nykyisille rakeisuusohealueille sijoittumisesta tai niiltä poikkeamisesta. Vähäiset rajojen ylitykset tai rajakäyrien sivuamiset on huomioitu likimain merkinnällä. Pohjamaiden vertailun mahdollistamiseksi on niistä laskettu rakeisuusluvut 0,063, 1 ja 8 mm seulojen läpäisyprosentteista.

Taulukko 5.1. Monitorointikohteiden sulamispainumisen havaittu riippuvuus routimisesta, painumisajankohta sulamiseen nähden ja rakennekerrosten sekä pohjamaan laatu.

	<i>Riippuvuus routanoususta</i>	<i>Riippuvuus roudan tunkeutumisyyvyydestä</i>	<i>Painuminen ennen vai jälkeen tukikerroksen sulamisen</i>	<i>Painuminen ennen vai jälkeen alusrakenteen sulamisen</i>	<i>Tukikerros (nykyisiin ohjealueisiin nähden)</i>	<i>Alusrakenne (nykyisiin ohjealueisiin nähden)</i>	<i>Pohjamaan rakeisuus (0,063 + 1 + 8 mm:n läpäisy)</i>
Karkku	ei	ei	osittain jälkeen	osittain aikana	kohtalaisesti hienontunut	hienoaineksen ylitys	243
Kitee	kyllä	osittain kyllä	jälkeen	aikana	kohtalaisesti hienontunut	~OK	220
Kuopio	-	-	jälkeen	aikana	kohtalaisesti hienontunut	~OK	210
Liminka	osittain kyllä	osittain kyllä	jälkeen	osittain aikana	kohtalaisesti hienontunut	Hk ylitys	246
Tornio 899	ei roudi	osittain kyllä	aikana	ennen	-	-	-
Tornio 909	ei	osittain kyllä	jälkeen	aikana	-	-	-
Tornio 921	kyllä	osittain kyllä	jälkeen	osittain aikana	alaosa kohtalaisesti hienontunut	~OK	149
Tornio 925	ei	ei	jälkeen	aikana	alaosa kohtalaisesti hienontunut	~OK	221
Tornio 932	ei roudi	osittain kyllä	aikana	osittain aikana	alaosa voimakkaasti hienontunut	Hk/ha ylitys	145
Tornio 945	ei roudi	osittain kyllä	aikana	ennen	alaosa voimakkaasti hienontunut	Hk ylitys	198
Varkaus	ei	ei	jälkeen	osittain aikana	kohtalaisesti hienontunut	~OK	150
Viiala	osittain kyllä	osittain kyllä	jälkeen	jälkeen	OK	hienoaineksen ylitys	192

Routimattomilla kohteilla sulamispainumat näyttävät syntyvän muista kohteista poiketen tukikerroksen sulamisen aikana. Tukikerroksen kuntoon ei havainnosta ole suoraan johdettavissa yhteyttä. Tornion kohteiden 932 ja 945 tapauksissa sepeli näyttäisi olevan voimakkaasti hienontunutta tukikerroksen alaosassa, mutta kohteen 945 epäluotettava näytteenotto ei mahdollista suorien johtopäätösten tekemistä. Pohjamaan pieni rakeisuusluku ei taulukon 5.1 perusteella näytä ennustavan routimattomuutta, vaan hienoaineksen läpäisyprosentti on rakeisuuskuvaajia 4.7 ja 4.8 kohteiden routimiskäyttäytymiseen verrattaessa parempi indikaattori routivuuden arviointiin. Suurimmassa osassa kohteita sulamispainuminen näyttää tapahtuvan tukikerroksen sula-

misen jälkeen alusrakenteen sulamisen aikana, mutta alusrakenteen kuntoon ei tälläkään havainnolla ole johdettavissa yhteyttä.

5.3 Raidesepelin hienonemisnopeus eri vuodenaikoina

Yleisesti tiedetään raidesepelin hienonevan liikennekuormituksen vaikutuksesta, mikä takia raide vaatii aika-ajoin tukemista alkuperäisen geometrisen aseman palauttamiseksi. Tämän perusteella mittausaineistosta määritettiin pölkyn painumisen perusteella syksyisin ja keväisin tapahtuvasta raidesepelin hienonemisesta johtuva painumanopeus, jota jatkossa nimitetään kulumisnopeudeksi. Syksyltä ja kesältä valitun tarkasteluvälin pituus vaihtelee sen mukaan, kuinka pitkä ehyt jakso dataa oli kohde ja vuosikohtaisesti saatavilla.

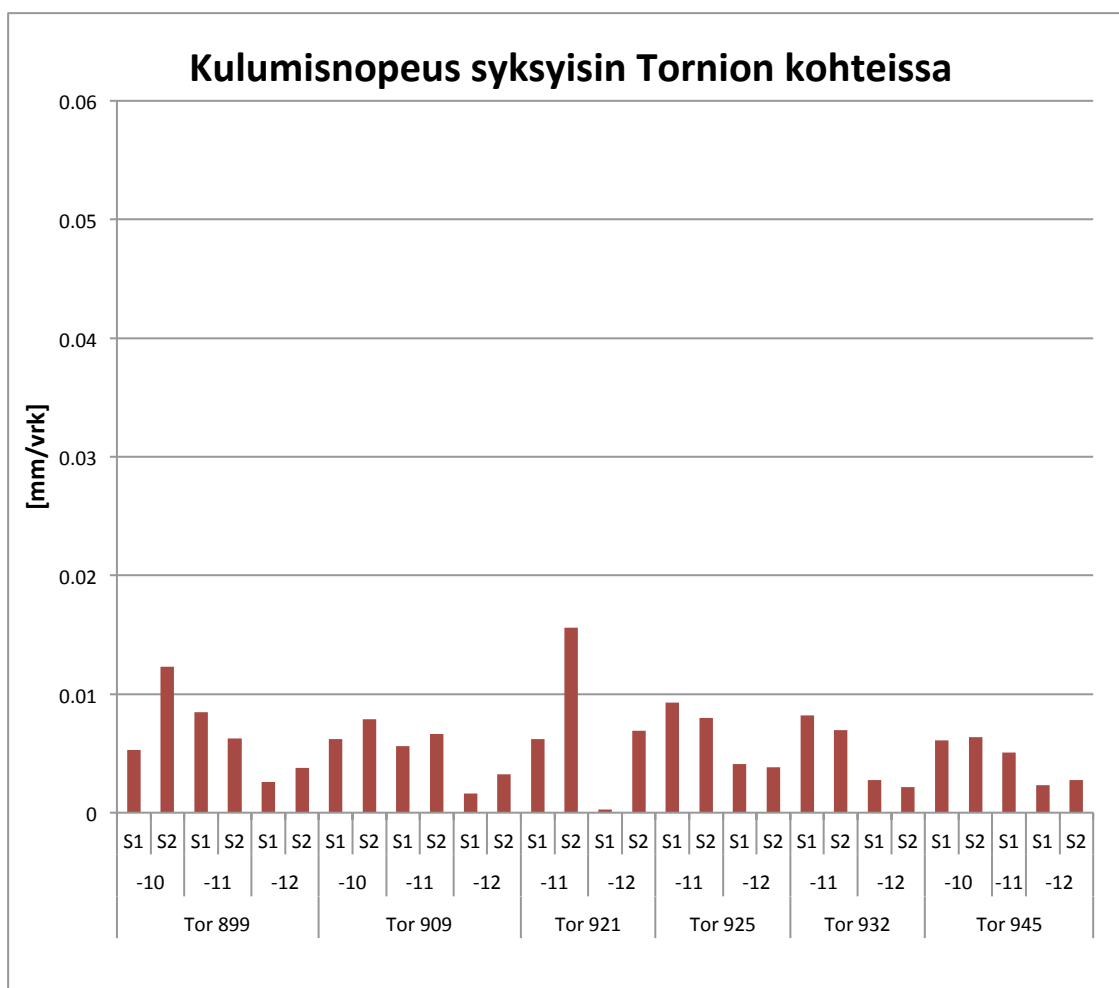
Luvussa 5.1 esitetyistä kuvaajista voidaan nähdä routineista kohteista selkeä taitepiste, jossa sulamispainuman syntyminen tasaantuu äkillisesti. Tämän jälkeen saattaa tarkastelujaksosta riippuen seurata loivempi, mutta kesäkautta nopeampi painumisen jakso, mikä tuli rajata pois edustavaa kesäkauden kulumisnopeutta määritettäessä. Kesäkauden kulumisnopeus on laskettu tästä tapauskohtaisesti valitusta pisteestä elokuun alkuun saakka. Vastaavasti syksyn kulumisnopeus on määritetty elokuun alusta, kunnes ratarakenne on alkanut syksyllä ensimmäisen kerran jäätyä.

Kuluminen laskettiin valitun tarkasteluvälin alussa ja lopussa vallinneiden ratapölkyn korkeusasemien erotuksena, joka jaettiin tarkasteluvälin pituudella vuorokausina. Ratapölkyn molemmille päille S1 ja S2 nopeudet on laskettu erikseen. Kuluminen on pääosassa tapauksista sekä syksyisin että keväisin hyvin tasaista, kuten edellä esitetyistä kuvaajista voidaan nähdä. Näin ollen suoraviivaisesti määritetty kulumisnopeus kuvaa ilmiötä hyvin ja tekee tarkastelujaksoista vertailukelpoisia keskenään.

Koska mittaus on suoritettu vain yhden pölkyn päistä, tulee suhtautua varauksella siihen kuinka hyvin yksittäisen pölkyn käyttäytyminen kuvaa muutoksia laajemmalla alueella monitorointialueen ympärillä. Yksittäisen ratapölkyn epätasainen tukeutuminen tukikerrokseen voi aiheuttaa huomattavasti suuremmat rasitukset toisen pään alapuolelle, jolloin myös hienoneminen tämän pölkyn kohdalla on nopeampaa. Kulumisnopeuden suuria vaihteluita eri vuosien välillä voidaan osaltaan selittää sääolojen vuotuisilla eroilla, vaihteluilla liikennekuormituksessa ja tukemiskertojen aiheuttamilla muutoksilla pölkkyjen kontaktissa tukikerrokseen.

5.3.1 Syyskauden kulumisnopeus

Kuvan 5.14 perusteella syyskauden kulumisnopeuksissa Liminka ja Viiala eroavat muista kohteista selvästi ainakin huippuarvojensa osalta johtuen todennäköisimmin selvästi muita suuremmasta liikennekuormituksesta. Syksyllä 2010 esiintyy erityisen nopeaa kulumista ainakin Limingan ja Viialan kohteissa, joskin erot pölkyn päiden

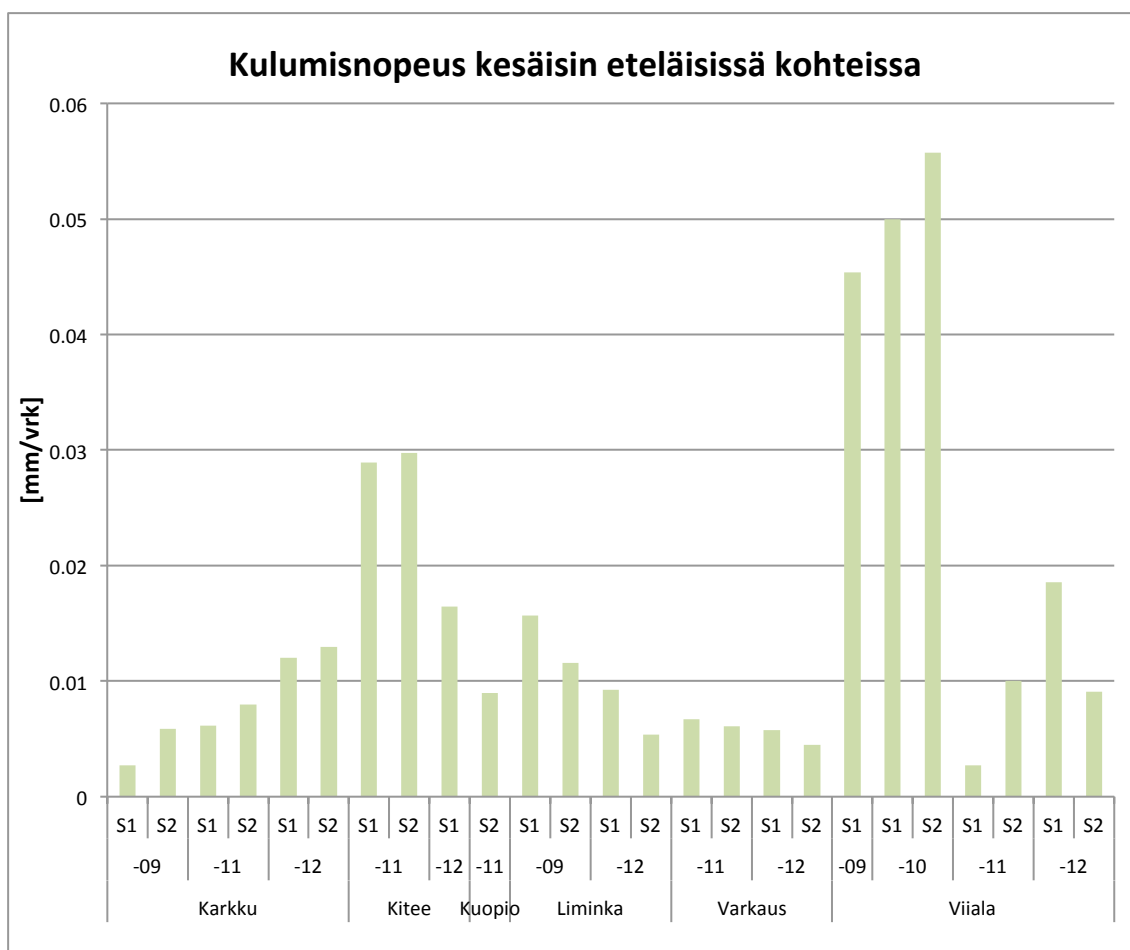


Kuva 5.15. Kulumisnopeus syksyisin Tornion kohteissa.

5.3.2 Kesäkauden kulumisnopeus

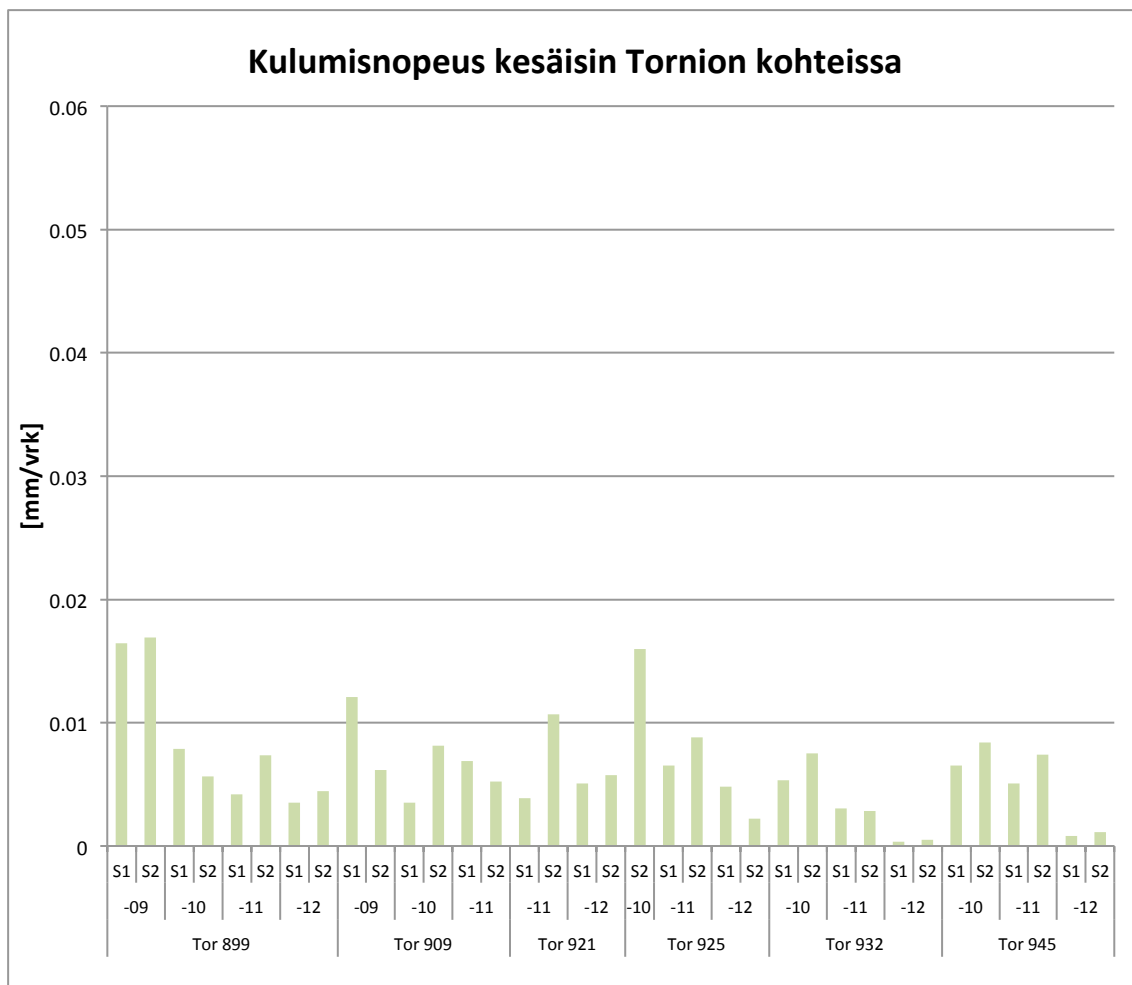
Kesäkuluminen on kuvan 5.16 perusteella eteläisissä kohteissa keskimäärin vähän nopeampaa kuin kuvassa 5.14 syksyisin. Mitään yleistä trendiä vuosien ja kohteiden välille ei ole löydettävissä. Viialan muita korkeammat arvot ennen kevättä 2011 selittyvät osittain sillä, että kyseisenä keväänä raiteelle on tehty tukeminen, minkä jälkeen kesäaikainen kuluminen näyttää hidastuneen huomattavasti. Tukemisen sepeliä hienontavan ja löyhdyttävän vaikutuksen johdosta esiintyy lähes poikkeuksetta nopean painumisen jakso, jonka jälkeen tukeutumistila muuttuu joksikin aikaa stabiilimmaksi liikennekuormituksen aiheuttaman tiivistymisen vaikutuksesta. Viialassa sepeli oli kuitenkin kevään 2011 tukemisen aikana siinä määrin karkearakeista, ettei sen ollut mahdollista enää tiivistyä tukemisen jälkeen.

Viialassa sulamispainumat ovat olleet muita kohteita huomattavasti jyrkempiä, mikä on puolestaan enteillyt nopeaa kesäaikaista kulumista. Sama ilmiö on myös havaittavissa Kiteen kohteessa kevään 2010 osalta, jolloin suurta sulamispainumaa on seurannut nopeahko kesäaikainen kuluminen.



Kuva 5.16. Kulumisnopeus kesäisin eteläisissä kohteissa.

Kuvan 5.17 perusteella voidaan todeta liikennemäärän näkyvän kesän kulumisnopeuksissa, koska Tornion kohteet jäävät keskiarvoisesti selvästi eteläisiä kohteita matalammalle. Myös Tornion kohteiden huippuarvot jäävät selvästi eteläisten kohteiden korkeimmista arvoista. Jonkinlainen stabiloitumiskehitys on nähtävissä vuodesta 2009 eteenpäin, vaikka erot pölkyn päiden välillä vuosikohtaisesti voivat olla suuriakin. Tähän todennäköinen syy on päällysrakenteen uusimisen jälkeen tapahtunut tukikerroksen tiivistyminen ja asemoituminen liikennekuormitusta sekä uutta rakeisuutta vastaan järjestykseen.



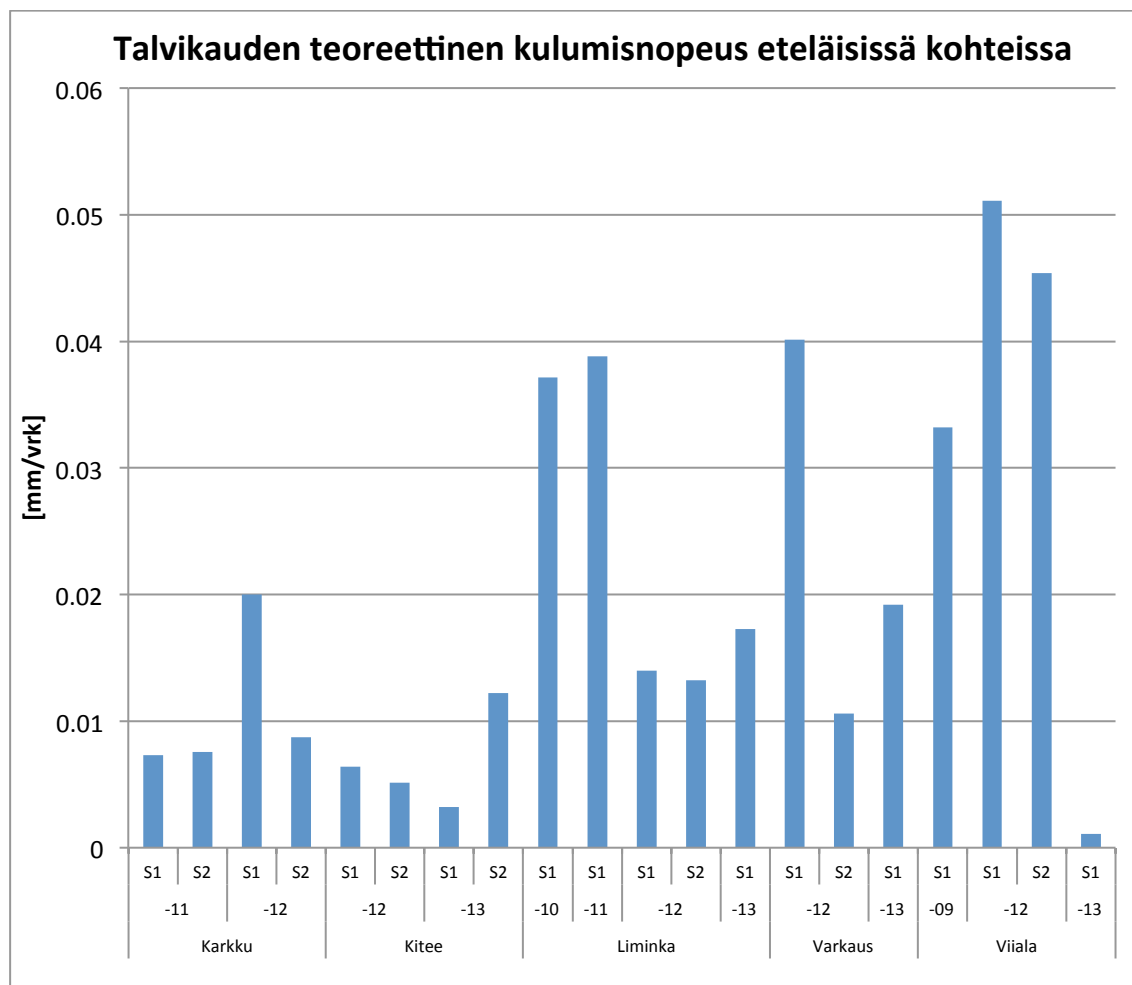
Kuva 5.17. Kulumisnopeus kesäisin Tornion kohteissa.

5.3.3 Talvikauden teoreettinen kulumisnopeus

Talvikauden ajalta laskettiin teoreettinen kulumisnopeus sillä olettamuksella, että kaikki sulamispainuma syntyi sepelin hienonemisesta talvikaudella, mutta tiivistyminen ja siitä johtuva painuminen tapahtuisivat vasta keväällä tukikerroksen sulamisen aikana. Tarkasteluvälinä laskemisessa käytettiin aikaa, jona tukikerros on ollut jäässä kyseisenä talvena. Vuosina, jolloin sulamispainuma on jäänyt alle yhden millimetrin, kulumisnopeutta ei ole laskettu.

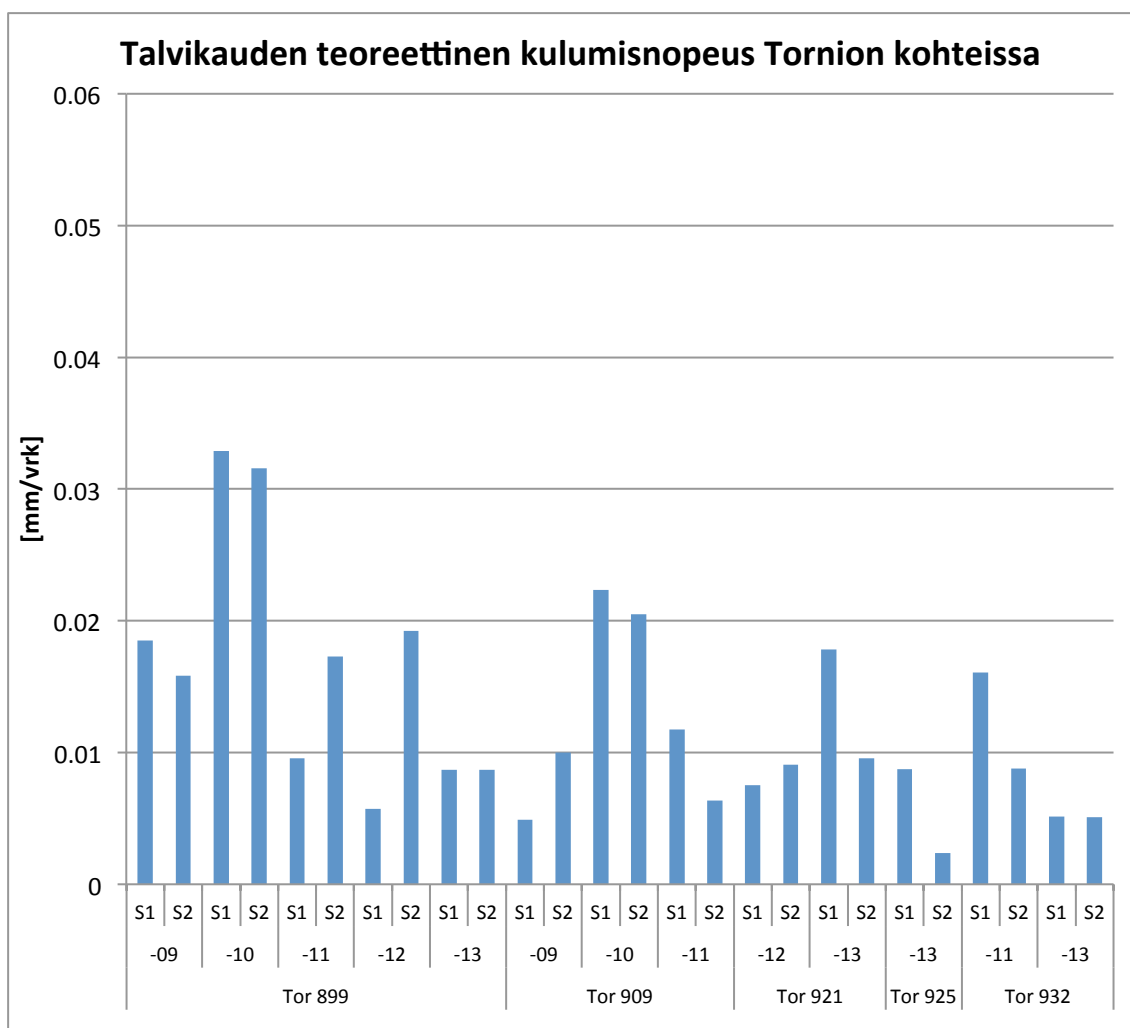
Talven teoreettinen kulumisnopeus ei kuvan 5.18 perusteella keskimäärin ylitä samojen kohteiden kuvan 5.16 kesäaikaista kulumisnopeutta, mutta on nopeampaa kuin syksyisin. Kohteiden ja vuosien välistä vertailtavuutta vaikeuttaa se, ettei ehyttä dataa ollut saatavilla aina samojen vuosien syys- ja kesäkausilta. Viialan ja Limingan kohteet nousevat tässäkin tarkastelussa esiin, joten liikennemäärällä voidaan todeta olevan selvä vaikutus kulumisnopeuteen. Syksyä ja osittain kesää korkeammat kulumisnopeudet talvikauden aikana tukisivat myös luvussa 3.5 esitettyä ajatusta siitä, että tal-

vella tukikerrokseen mobilisoituvat korkeammat jännitykset hienontaisivat sepeliä sulaa aikaa enemmän.



Kuva 5.18. Teoreettinen kulumisnopeus talvisin eteläisissä kohteissa.

Kuvan 5.19 perusteella myös Tornion kohteissa talvikauden teoreettinen kulumisnopeus on suurempi kuin syksyllä kuvassa 5.15 ja keskimäärin samaa tasoa kesäajan kanssa kuvan 5.17 mukaisesti. Suuri vuosien ja kohteiden välinen vaihtelu kulumisnopeudessa näyttää koskevan myös tätä puhtaasti teoreettista arvoa. Tornion kohteissa 899 ja 909 syksyllä 2009 tehdystä tukemisesta johtuva tiivistyminen saattaa kasvattaa seuraavan kevään sulamispainumaksi tulkitun painuman määrää ja näin ollen kasvattaa teoreettista kulumisnopeutta. Kummassakin kohteessa kulumisnopeudet vaikuttavat pienenevän rakentamisen tai tukemisen jälkeen tukikerroksen asettumisen myötä.



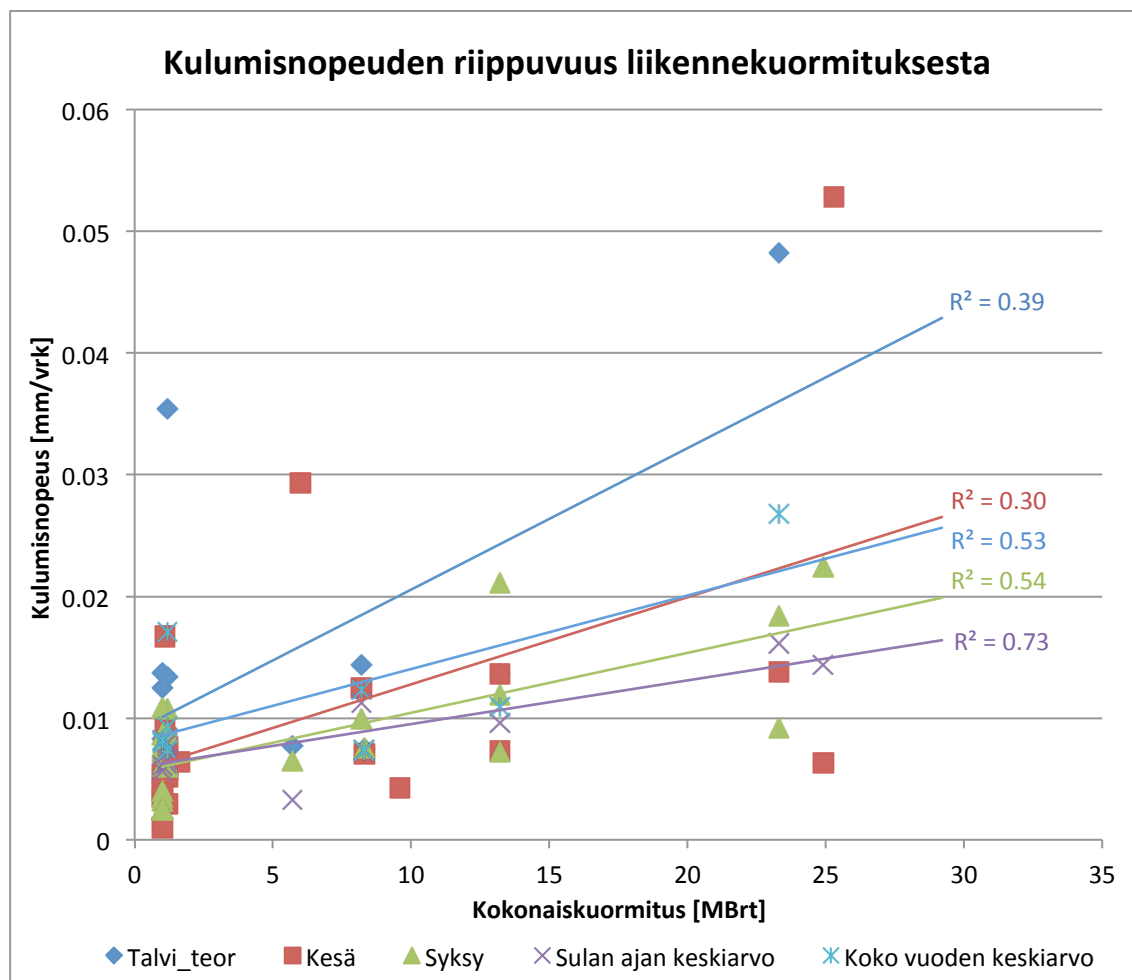
Kuva 5.19. Teoreettinen kulumisnopeus talvisin Tornion kohteissa.

Edellä todetusti olosuhteet vuosien välillä voivat vaihdella sääolojen, liikennekuormituksen ja raiteen tukemisen vaikutuksesta. Näistä kolmesta suurimman vaihtelun aiheuttaa kulumisnopeusvertailujen perusteella tukeminen. Toteutuneiden sääolojen paikallista vaikutusta ei pysty arvioimaan kovinkaan tarkasti monitorointiaineiston perusteella, vaan se vaatisi tarkempia selvityksiä. Sää vaikuttaa tukikerrokseen pidättyvän sadannan kautta sepelin hienonemissaltiliuteen ja jään määrään tukikerroksessa talvikaudella. Sadannan seurauksena erityisesti pohjamaan kyllästysaste voi kasvaa korkeaksi, mikä heikentää ratarakenteen alustan jäykkyyttä ja voi tätä kautta kasvattaa kulumisnopeutta. Liikennekuormituksen vaikutuksen selvittämiseksi tulisi tietää kokonaiskuormituksen jakautuminen kohteittain eri vuodenajoille.

5.3.4 Sulan ja jäätyneen ajan kulumisnopeuksien riippuvuus liikennekuormituksesta

Koska liikennekuormituksella on havaittu olevan selvä vaikutus edellä esitettyihin painumanopeuksiin, on tätä riippuvuutta syytä tarkastella enemmän. Kuvassa 5.20 on esitetty syksyn, kesän, näiden keskiarvon ja teoreettisen talviaikaisen kulumisnopeu-

den riippuvuus bruttoliikennekuormituksesta. Yksittäinen havaintopiste edustaa tässä ratapölkyn molempien päiden siirtymien aritmeettista keskiarvoa. Tarkastelujakson 2012–2013 liikennekuormituksena on käytetty vuoden 2011 tietoja, koska vuoden 2012 tietoja ei ole julkaistu tämän työn tekemisen aikana.



Kuva 5.20. Syksyn, kesän, näiden keskiarvon, teoreettisen talviajan ja vuoden keskiarvoisen kulumisnopeuden riippuvuus bruttoliikennekuormituksesta.

Kokonaiskuormituksesta kaikkein heikoimmin näyttävät riippuvan kesän ja teoreettisen talviajan kulumisnopeuksien arvot 0,30:n ja 0,39:n selitysasteillaan. Syksyn ja koko vuoden keskiarvojen selitysasteet 0,56 ja 0,53 ovat jonkin verran parempia, mutta sulanajan keskiarvo näyttää tarjoavan parhaimman 0,73:n selitysasteen. Tarkasteluvälin pidentyessä on johdonmukaista, että selitysaste kasvaa, koska liikennekuormituksen jakautumisesta vuoden sisällä ei ole tietoa, ja pölkkyjen välinen jako kuorman kannossa on tasaisempi pidemmällä aikavälillä. Koko vuoden kulumisnopeuden sulaa aikaa heikompi riippuvuus liikennekuormituksesta taas antaa syyn otaksua, että teoreettisen talviaikaisen kulumisnopeuden kohdalla olisikin kyse myös jostain muusta kuin sepelin kulumisesta. Tällöin sulamispainumien aiheuttaja, ainakin osaltaan, olisi jokin jäätymis-sulamissyklin aiheuttama muutos, eikä pelkästään liikennekuormituksen aiheuttama raideseppelin hienoneminen.

5.3.5 Havaittu painuminen rakenteen ollessa jäässä

Kaikista muista kohteista poiketen kohteessa Tornio 899 voidaan havaita ratapölkyn painumisen jatkuvan selvästi läpi talven ainakin kahtena talvena. Tarkastelujaksolla 2011–2012 painuminen on hitaampaa, mutta 2010–2011 selvemmin havaittavissa kuvan 5.6 mukaisesti. Talvella 2010 painuminen on kaikkein selvintä rakenteen jäässä olon aikana, mutta tähän on todennäköisesti vaikuttanut osaltaan syksyllä 2009 tehty raiteen tukeminen, minkä jälkeinen tiivistyminen selittää osan painumisesta. Kaikkina tarkastelujaksoina erityisesti ratapölkyn toinen pää pyrkii painumaan huomattavasti toista nopeammin. Kohteen poikkeava käyttäytyminen liittyy uuden sepelin karkearakeisuuteen siten, että vesi ei jäätyessään pääse muodostamaan kovin vahvoja sidoksia tasarakeiseen sepeliin. Tällöin uudelleen järjestyminen on mahdollista hienontumisen myötä läpi talven.

Kohteessa Tornio 899 nopea talviaikainen painuminen tukisi ajatusta siitä, että talvella jäykemmän alusrakenteen aiheuttamat suuremmat rakeidenväliset jännitykset johtaisivat sepelin sulaa aikaa nopeampaan hienonemiseen. Yhden kohteen havaintojen perusteella ei voida kuitenkaan määrittää kuinka paljon jäänytynyt ja sitä kautta jäykempi alapuolinen rakenne kasvattaa hienonemisnopeutta. Tämän lisäksi tukikerroksen jäätymisaste vaihtelee vuosittain, joten asiaa tulisi tutkia vakioituissa olosuhteissa luotettavien tulosten saamiseksi. Olisi myös oleellista selvittää, minkä takia routimattomina talvina kohteessa Tornio 909 ei esiinny talviaikaista painumista, vaikka tukikerros on uusittu samaan aikaan ja samalla menetelmällä kuin kohteessa 899.

Ratapölkyn eri päiden välillä painuminen vuoden sisällä voi olla huomattavasti enemmän toisistaan poikkeavaa kuin esimerkiksi kahden eri tarkasteluvuoden välillä. Syitä tällaiseen käyttäytymiseen voivat olla ratapölkyn epätasainen tukeutuminen sepeliin tai epätasaisuuden aiheuttamien dynaamisten voimien takia kasvaneet pyöräkuormat ja sitä kautta korkeammat jännitystasot pölkyn alapuolella.

Keväinä 2009 ja 2010 painuminen kiihtyy sulamisen aikana Tornio 899:ssä samaan tapaan kuin selvästi routanousuille altistuneissa kohteissa. Tämä nopea painumisjakso voi johtua rakenteen täydellisen sulamisen jälkeen talven aikana hienontuneen sepelin lopullisesta tiivistymisestä ja osittain muista sulamisen aiheuttamista muutoksista rakenteen toiminnassa. Huomionarvoista on, että hetkellinen painumisen nopeutuminen, joskaan ei yhtä jyrkkänä, esiintyy lähes kaikissa kohteissa kaikkina tarkasteluvuosina riippumatta routanousujen esiintymisestä tai talviaikaisesta painumisesta.

5.3.6 Sepelin hienontumisen aiheuttama tiivistymisnopeus verrattuna havaittuun ja laskettuun painumisnopeuteen

Luvussa 3.5 on esitetty raidesepelin irtotiheyden vaihteluväliksi $1600\text{--}2200\text{ t/m}^3$ elinkaaren alun ja lopun välillä aiempien tutkimusten yhteydessä tehtyjen näytteenottojen

perusteella. Nämä arvot edustavat ääritapauksia, joten suurin osa käytössä olevasta sepelistä sijoittuu näiden arvojen väliin. Laskennallisesti irtotiheyden kasvaminen 600 t/m^3 aiheuttaa 37,5 prosentin tilavuuden pienenemisen, jolloin jauhautumiselle alttiina oleva teoreettisesti 300 mm:n paksuinen pölkyn alapuolinen tukikerroksen osa painuisi 110 mm elinkaarensa aikana. Todellisuudessa pölkyn alapuolinen tukikerroksen osa voi lisäsepelöinnistä johtuen olla merkittävästi paksumpi. Painumisen havaitseminen silmämääräisesti on mahdotonta, koska raiteelle tehtävä tukeminen häivyttää tukikerrokseen syntyneitä muodonmuutoksia. Tyypillinen elinkaaren pituus raideseapelille on liikennekuormituksesta ja tukemiskerroista riippuen 20 vuodesta ylöspäin (Nurmikolu 2000), mikä antaisi keskimääräiseksi vuotuiseksi painumaksi 5,5 mm tai vähemmän.

Mittausaineistoa vuositasolla tarkasteltaessa suurin osa mitatuista ratapölkyn päiden kokonaispainumista on välillä 2–9 mm. Edellä esitetty alle 5,5 mm:n vuotuinen kokonaispainuma sopisi näin ollen havaittuihin arvoihin. Vuosien välisistä eroista huolimatta havaituissa painumissa esiintyy siinä määrin suuria arvoja, että kokonaispainumaan jää monessa tapauksessa kulumisen lisäksi selittämätön komponentti, johon pitää hakea syitä jäätymis-sulamissyklistä.

5.4 Sulamispainuman riippuvuus jäätymis-sulamissyklin aikaisista muutoksista

Luvussa 3.3.1 esitetyn sulamiskonsolidaatioteorian mukaisesti sulamisen nopea eteneminen rakenteen vedenpurkukykyyyn nähden voi aiheuttaa hienorakeisissa maaleissa huokosvedenpaineen kasvamisen riskin, ja johtaa edelleen sen aiheuttaman lujuuden alenemisen takia merkittäviin muodonmuutoksiin. Sulamiskonsolidaatiosuhteen R määrittäminen edellyttäisi käytettävissä olevaa aineistoa tarkempia mittauksia, joten tässä tarkastellaan pelkästään sulamispainuman riippuvuutta rakenteen sulamisnopeudesta. Tarkka konsolidaatioasteen määrittäminen eri ajanhetkillä edellyttäisi myös kerrokselliselle maarakenteelle soveltuvan laskentamenetelmän käyttöä, jonka esittäminen on rajattu tämän työn ulkopuolelle.

5.4.1 Riippuvuus rakenteen sulamisnopeudesta

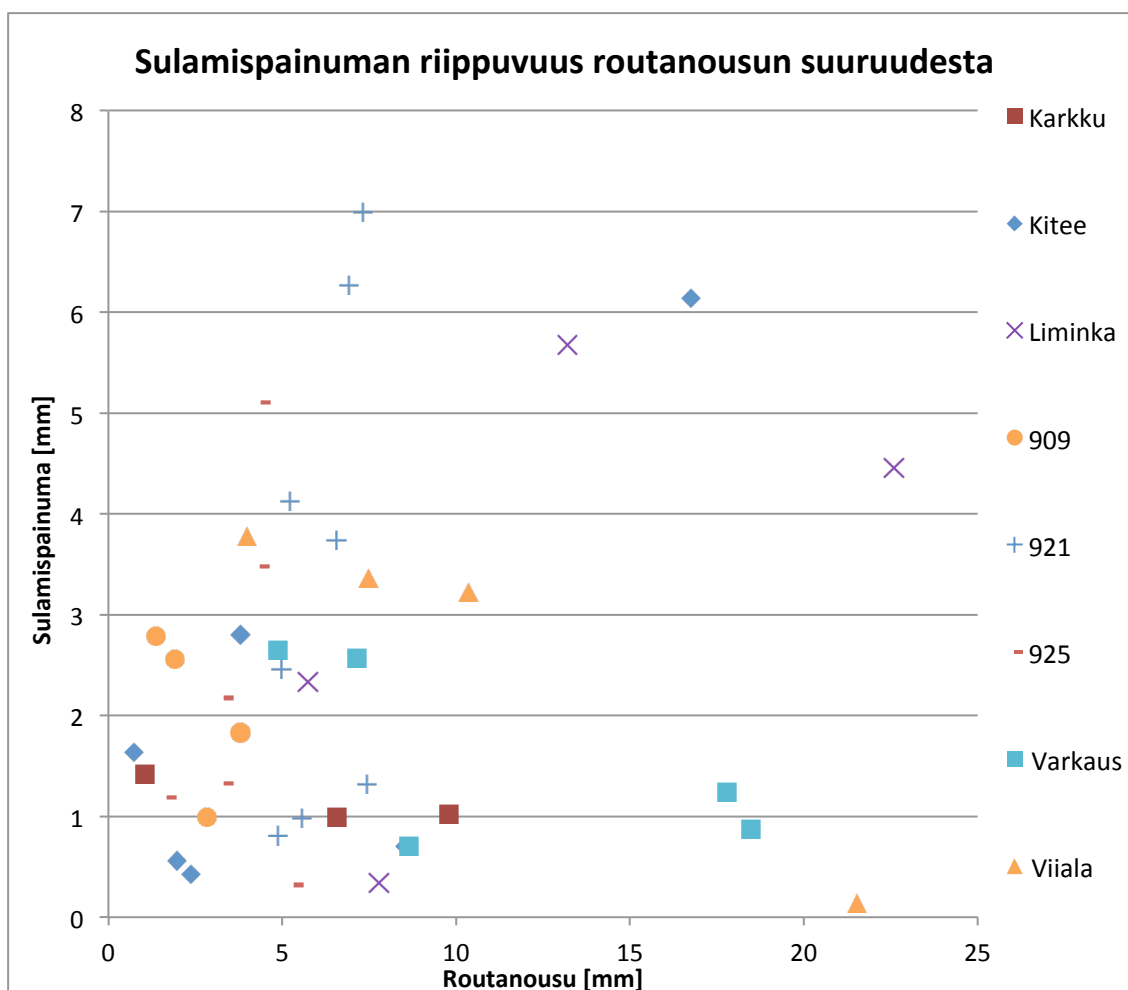
Kuvassa 5.21 on esitetty sulamispainuman riippuvuus kyseisen vuoden pintasulamisnopeudesta kohdekohtaisesti. Tässä yksittäiset havaintopisteet edustavat painuman osalta ratapölkyn päiden keskiarvoa. Pintasulamisen nopeus on laskettu hetkestä, jolloin tukikerros on alkanut sulaa hetkeen, jolloin rakenne on kokonaan sulanut. Sulamisen eteneminen voi olla vuosikohtaisesti hyvinkin epätasaista, mutta tässä kaikki tapaukset on pelkistetty tarkasteluksi keskimääräisellä sulamisnopeudella. Eniten keskimääräisestä sulamisnopeudesta poikkesi kaikissa kohteissa huokostilaltaan avoin ja vaihtelevasti jäätä sisältävä tukikerros, joka sulaa nopeasti muuhun rakenteeseen nähden.

Viialan jyrkkään riippuvuuteen sulamisnopeudesta ei löytynyt mitään yksiselitteistä tekijää. Yhdistäviä tekijöitä kohteille ovat routalevytön rakenne, kaikissa pohjamaa on routivaa ja sulamisen eteneminen lähes yhtä nopeaa.

5.4.2 Riippuvuus routanousun suuruudesta

Luvun 3.3.1 perusteella tiedetään routimisen aiheuttavan erityisesti savissa muutoksia, joiden takia maamateriaalin käyttäytyminen voi merkittävästi poiketa jäätymistä edeltävästä tilanteesta. Saven mikro- ja makrotason rakenteelliset muutokset voivat aiheuttaa sen pakkautumisen erityisesti in-situ kuormia suuremmilla jännitystiloilla alkupe-
räistä tiiviimpään tilaan. Näin ollen sulamisen jälkeen olisi mahdollista syntyä jäälins-
sin nousua suurempi painuma. Tulee kuitenkin huomioida, että kaikkien kohteiden pohjamaa on päässyt jäätymään geologisen historiansa aikana lukuisia kertoja sy-
vemmältä kuin mihin routa ratarakenteen alapuolella nykyisin yltää rankimpinakaan talvina. Koska muutokset ovat suurimpia ensimmäisillä jäätymiskerroilla, voidaan näiden merkityksen jäävän vähäiseksi.

Kohteista vain Karkun ja Viialan kohteiden pohjamaat sisälsivät merkittävässä määrin savilajitetta. Merkittävämpi muutoksia aiheuttava tekijä jäälinsien sulamisen jälkeen onkin todennäköisesti paikallisesti purkautuva suurehko vesimäärä, joka voi aiheuttaa merkittävää lujuskatoa pitkänajan tilanteeseen nähden. Kuvassa 5.22 on esitetty su-
lamispainumien riippuvuus routanousujen suuruudesta. Tässä yksittäiset havaintopis-
teet edustavat painuman osalta ratapölkyn yhdestä päästä mitattua siirtymän arvoa.



Kuva 5.22. Sulamispainumien riippuvuus kohteittain routanousun suuruudesta.

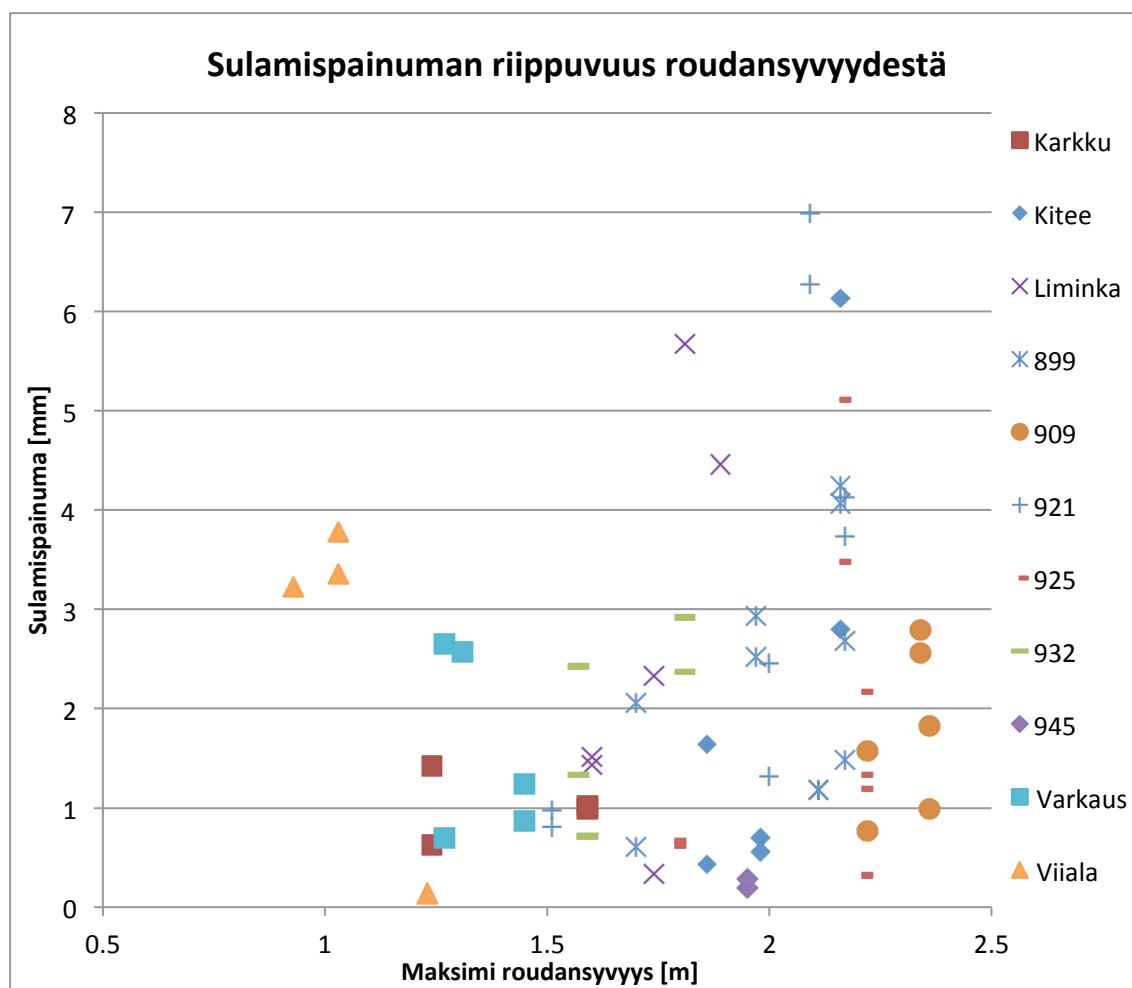
Kuvan 5.22 tarkastelusta puuttuvat Tornion kohteet 899, 932, 945 ja tarkastelujakson 2008–2009 osalta 909, koska näissä ei käytännöllisesti katsoen esiintynyt routanousuja. Sulamispainumaa näissä kohteissa esiintyi kuitenkin alle yhdestä yli neljään millimetriin. Kuopiosta ei ollut kuin yksi luotettava sulamispainumahavainto, minkä takia riippuvuuden tarkastelu ei ole mahdollista. Yleisesti ottaen trendit kohteiden välillä poikkeavat toisistaan huomattavasti enemmän kuin sulamisnopeuden tapauksessa. Osassa kohteita riippuvuus routanousun määrästä on positiivinen ja osassa negatiivinen. Myös trendiviivojen kulmakertoimet hajoavat siinä määrin, ettei routanousun suuruus tuo kohteiden välille juuri minkäänlaista yhteyttä.

Positiivisesti routanousun suuruuden kanssa korreloivien Karkun, Kiteen, Tornio 921 ja 925 kohteiden ainoa yhdistävä tekijä on, että mihinkään näistä kohteista ei ole asennettu routalevyä. Pohjamaan laatu vaihtelee siltimoreenista hiekkaan ja rakennekerrosten paksuus 1,15 metristä 2 metriin. Positiivisen routanousukorrelaation avulla olisi mahdollista perustella painumista jäälinsien luoman tyhjätilan ja tiivistymisen aiheuttamiksi. Kuitenkin osan kohteita negatiivinen korrelaatio ei tue tätä ajatusta ja routamisen suuruus ei näin ollen ole määräävästi yhteydessä sulamispainuman syntyyn.

5.4.3 Riippuvuus roudan tunkeutumisyydestä

Luvussa 3.3.2 esitettiin sulamisen aiheuttavan maarakeiden kontaktipintoihin tarttuneen veden aiheuttaman sidosvoiman, eli näennäisen koheesion, heikentymisen. Tämä johtaa edelleen siihen, että karkearakeinen materiaali on sulamisen jälkeen huomattavasti normaalia kuivaa aikaa alttiimpi pysyville muodonmuutoksille toistokuormituksessa eli sen resilient-ominaisuudet ovat heikommät. Näin ollen rakenteen jäätymissyvyydellä, riippumatta siitä syntyikö routanousua vai ei, voi olla rakennetta heikentävä vaikutus. Koska routanousuja ei synny kaikissa tarkastelukohteissa, mutta jonkinasteista sulamispainumaa kylläkin, on jäätymissyvyyden tarkastelu perusteltua.

Luvussa 5.1 esitettyjen routanousu- ja sulamispainumahavaintojen perusteella sulamispainumilla on joissain kohteissa korrelaatio routanousuihin, mutta kuten edellä on osoitettu, routanousut eivät tarjoa mitenkään yksiselitteistä yhteyttä painumien syntymiselle. Toisaalta routanousut ovat yleensä silloin suurempia, kun jäätyminen etenee syvemmälle routivaan pohjamaahan, jolloin sulaessa heikentyvän rakenteen läpimitta kasvaa. Kuvassa 5.23 on esitetty sulamispainuman riippuvuus maksimi roudansyvyydestä. Tässä yksittäiset havaintopisteet edustavat painuman osalta ratapölkyn yhdestä päästä mitattua siirtymän arvoa.



Kuva 5.23. Sulamispainuman riippuvuus kohteittain maksimi roudansyvyydestä.

Viialan ja Varkauden kohteet poikkeavat muista kohteista korreloiden negatiivisesti roudan syvyyteen, ja Karkun kohteesta ei ole juuri minkäänlaista korrelaatiota havaittavissa. Näissä kolmessa eteläisessä kohteessa on kuitenkin matalimmat roudansyvyydet, joten sulamistapahtuma todennäköisesti poikkeaa jollain tapaa syvemmältä routaantuneista vertailukohteista. Lopuissa kohteissa sulamispainumat kasvavat roudan tunkeutumissyvyyden kasvaessa kuvan 5.23 mukaisesti. Kohteet Kuopio ja Tornio 945 puuttuvat tarkastelusta samasta syystä kuin routanousutarkasteluistakin. Tulokset hajoavat kohteiden sisällä osassa kohteita kuten Tornio 909 ja 899:ssä, joten selitysasheet jäävät vaatimattomiksi. Routaeristetyt kohteet Liminka ja Viiala eivät poikkea muista millään yhtenevällä tavalla. Viialan kohteessa alusrakenteen alapuolelle asennettu routalevy todennäköisesti aiheuttaa muista poikkeavan sulamisen aikaisen käyttäytymisen. Painumat ovat suuria ja äkkinäisiä, vaikka routa ei tunkeudu kovin syvälle esimerkiksi verrattuna Karkkuun, joka sijaitsee likimain samalla leveysasteella.

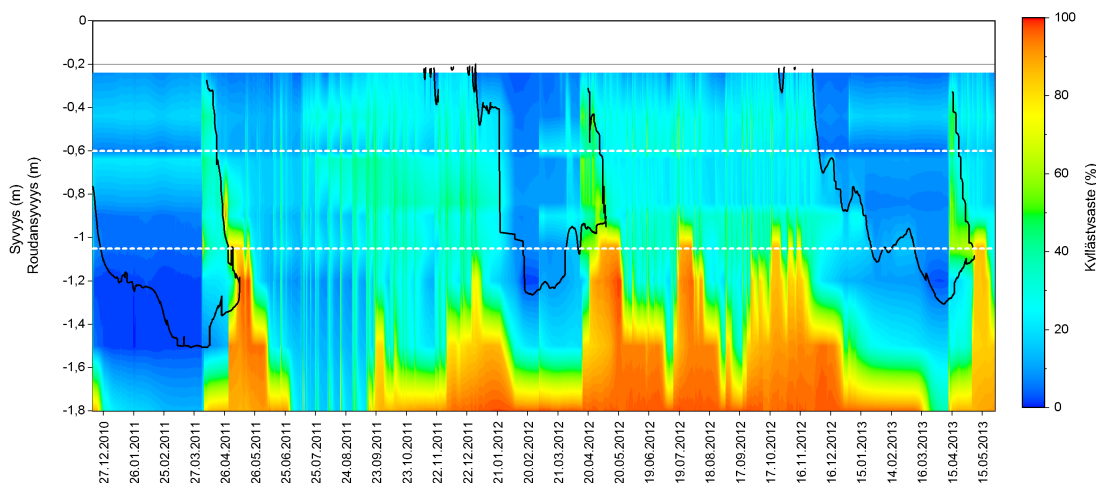
Karkun ja Varkauden kohteissa molemmissa rakenteiden kokonaispaksuus on suhteellisen ohut, 1,05–1,15 m, mutta silti niissä sulamispainumat eivät ole kehittyneet kovin suuriksi, vaikka routanousut ovat olleet huomattavia useana talvena. Roudan tunkeu-

tumissyvyyden kasvaessa 1,5 metristä alaspäin, alkaa painumia esiintyä kasvavasti. Kohteiden välistä hajontaa on vaikea selittää millään tässä tutkimuksessa mitatuilla tekijöillä, vaan syitä pitäisi hakea paikallisista kuivatusolosuhteista, rakennekerrosmaateriaalien laatuvaihteluista ja paikallisesti toteutuneista sääolosuhteista.

Edellä esitettyjen riippuvuustarkastelujen lisäksi pakkaskauden kesto, ratarakenteen jäässäoloaika tai tukikerroksen sulamisnopeus eivät tuottaneet parempaa selitystä sulamispainumille. Myös näissä tarkasteluissa riippuvuudet olivat osittain positiivisia ja osittain negatiivisia. Riippuvuuksien voimakkuudet hajosivat kohteiden välillä edellä esitettyjen tapaan hyvin paljon.

5.4.4 Rakenteen kosteustilan muutokset sulamisen aikana

Taulukossa 4.1 esitetty instrumentointi ei kata sekä siirtymä- ja lämpötilamittausta että kosteustilan mittausta kaikissa kohteissa samanaikaisesti. Kosteustilan osalta monitoroiduistakin kohteista osan data on puutteellista, joten edellä tarkastelussa olleiden kohteiden keskinäinen vertailu ei ole mahdollista. Tämän takia kosteustilan muutoksia käsitellään tässä yleispiirteisesti. Kuvassa 5.24 on esitetty esimerkinomaisesti Varkauden kohteesta kosteustilan muuttuminen ja rakenteen routaantuminen ajalta 12/2010–3/2013.



Kuva 5.24. Kosteustilan muuttuminen Varkauden kohteessa 2010–2013. Valkoiset katkoviivat osoittavat päällys- ja alusrakenteen alapintoja ja musta viiva routarajaa.

Edellä esitetyn perusteella kosteustilalla tiedetään olevan merkittävä vaikutus maan mekaanisen toiminnan kannalta. Optimitalanteessa kosteus sitoo maarakeita toisiinsa, mutta kyllästymispisteessä veden noste heikentää rakeiden välisiä kontaktivoimia. Pääosan talvikaudesta rakenne näyttää lähes tai täysin kuivalta, koska kosteusanturit ovat tällöin jäässä. Pakkaskauden aikana ja välittömästi sulamisen alettua voidaan nähdä kyllästysasteen selvä kasvaminen pienen ajan sisällä. Tämän perusteella rakenteen jääpitoisuuden voidaan otaksua olevan niin alhainen, että veden on mahdollista

liikkua avoimessa ilmatäytteisten huokosten verkostossa lähes esteettä. Eristyskerroksen alhainen vesipitoisuus viittaa siihen, että tukikerroksenkaan vesipitoisuus ei voi olla kovin suuri, koska alapuolella ei ole kylläistä kerrosta padottamassa vettä yläpuolelleen. Havainto tukisi ajatusta siitä, että sepelin olisi mahdollista hienontua tukikerroksen vähäisen jääpitoisuuden vuoksi.

Pohjamaa kyllästyy täysin Varkauden kohteessa hyvin nopeasti roudan sulamisen jälkeen, kun varsinaiset rakennekerrokset alkavat kuivua. Pohjamaan ja rakennekerrosten raja on määritetty yhden näytteenottopisteen perusteella, joten kyllästyminen ei välttämättä ylety rakennekerrosten puolelle. Pohjamaa ja rakennekerrosmateriaali ovat voineet sekoittua ajan saatossa, minkä takia alimpien kerrosten vedenpidätyskyky on kasvanut. Kesän 2011 ja 2012 ero sademäärissä tai pohjaveden korkeudessa näkyy pohjamaan selvästi erilaisina kyllästysasteina. Kumpanakaan syksynä ei rakennekerroksista ole havaittavissa merkittävää syyssateiden aiheuttamaa kyllästysasteen kasvua.

Syksyllä rakenteen kyllästysaste on 20–30 prosentin luokkaa molempina tarkasteluvuosina. Tämän perusteella voidaan todeta vesimäärän rakenteessa olevan sen verran pieni, että siinä säilyy läpi talven yhtenäinen ilmahuokosten verkosto. Edellä todettu havainto rakenteen nopeasta kastumisesta talven nollakeleillä ja välittömästi sulamisen aikana tukisivat toinen toisiaan syksyn alhaisen kyllästysasteen kanssa. Vesimäärän ollessa rakenteessa suhteellisen pieni sitoutuu se luvussa 3.3.2 esitetyllä tavalla rakeiden kontaktipinnoille meniscus-muotoon. Ratkaisevaa matalankin vesipitoisuuden tapauksessa rakennekerrosten jäykkyyden kannalta on kosteustilan kehityssuunta. Sulavasta rakenteesta on todettu veden aiheuttaman näennäisen koheesion häviävän, ja palaavan kuivumisen kautta veden asemoiduttua takaisin maan huokoskulmiin. Koska rakenne näyttää molempina kuvan 5.24 tarkasteluvuosina kuivuvan alkukesää kohden rakenteen kuitenkin täysin kuivamatta, olisi johdonmukaista, että veden pintajännityksestä aiheutuva koheesio palautuu. Tällöin myös rakennekerrosten resilient-moduuli palaa normaaliin kuivan ajan tasoa vastaavaan arvoon ja pysyvien muodonmuutosten syntyminen vähenee merkittävästi.

6 PÄÄTELMÄT PAINUMIEN SYISTÄ

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää ratapenkereen monitoroinnin yhteydessä havaittujen sulamispainumien syitä ja esiintymisen riippuvuutta eri tekijöistä. Ilmiön todettiin esiintyvän vuotuisen jäätymis-sulamissyklin seurauksena keväisin, mutta monitoroinnista tehtyjen havaintojen perusteella painumiselle ei voitu johtaa yksiselitteistä syytä jäätymis-sulamissyklin maassa aiheuttamista muutoksista.

Keväällä sulamisen yhteydessä tapahtuva painuminen voidaan jakaa kahteen päätyyppiin. Selvästi routineilla kohteilla painumamuoto on jyrkkä routanousun sulamisesta alkava ja päättyy taitekohtaan, jossa painuminen tasaantuu kohteelle tyypilliseksi raideseppelin kulumisnopeudeksi. Painuminen tapahtuu tällöin pääosin vasta tukikerroksen sulamisen jälkeen. Routimattomilla kohteilla painumamuoto on hyvin loiva ja tasaantuu lähes saman tien; korkeintaan muutaman vuorokauden kuluessa tukikerroksen sulamisen alkamisesta.

Luvussa 5.2.4 todettiin raideseppelin sulan ajan kulumisnopeuden korreloivan parhaiten kohteen liikennekuormituksen suuruuden kanssa, ja koko vuoden keskimääräisen kulumisnopeuden korrelaatio liikennekuormitukseen todettiin jonkin verran sulaa aikaa heikommaksi. Sulamispainumat, joiden perusteella teoreettiset talviaikaiset kulumisnopeudet laskettiin, muodostuvat siis osaksi jonkin muun tekijän kuin liikennekuormituksen aiheuttaman raideseppelin hienonemisen takia. Routimattomissa kohteissa esiintyvät havaintojoukon pienimmät painumat ovat nykytietämyksen valossa selitettävissä raideseppelin kulumisella. Luvussa 5.3.6 todettiin sepelin kulumisesta johtuvan tiivistymisen olevan laskennallisesti noin 5,5 mm tai vähemmän vuotuisesti. Pienimmät sulamispainumat olivat 1–2 mm:n luokkaa ja tyypillinen sulan ajan kulumisnopeus noin 0,01 mm/vrk. Rakenteen ollessa jäässä kohteesta riippuen 3–4 kuukautta vuodesta, tulisi vuotuiseksi kokonaispainumaksi sulamispainuma ja sulan ajan kulumisen yhteenlaskettaessa hieman alle 5 mm. Tällöin sepelin kulumisen selittäisi varsin hyvin routimattomien kohteiden painumisen

Selvästi routineissa kohteissa raideseppelin talviaikainen kulumisen ei kuitenkaan riitä selittämään keväällä syntyneitä painumia, koska painumat ovat useita millimetrejä suurempia kuin routimattomissa kohteissa. Luvussa 5.3 esitettyjen riippuvuustarkastelujen perusteella voidaan todeta, ettei sulamispainuman suuruus riipu pelkästään yhdestä tekijästä vaan on todennäköisesti usean tekijän summa. Kuitenkin useassa tapauksessa rakenteen nopea sulaminen johti suhteellisen pieniin sulamispainumiin. Ra-

kenteen jäätyminen, routiminen ja sulaminen ovat riippuvaisia useasta eri säähän ja rakenteen ominaisuuksiin liittyvästä tekijästä, joten mikään edellämainituista ilmiöistä ei toistu täysin samalla tavalla eri vuosina. Muutaman viikon sulamisaikana rakenteeseen kohdistuva liikennekuormituskin voi vaihdella vuosien välillä, joten on ymmärrettävää, että painumien kehittyminen voi näyttää tässä työssä esitettyjen tarkastelujen kautta osittain sattumanvaraiselta.

Vuosittain vaihtelevasti kehittyvä jäätymis-sulamissykli ja routiminen johtavat tilanteeseen, jossa rakenne on aina eri tavalla altis liikennekuormituksen aiheuttamille muodonmuutoksille. Pohjamaassa tapahtuva sulamiskonsolidaatio ei anna hyvää selitystä painumiselle ratojen pitkän olemassaolohistorian valossa, koska pohjamaan ylin osa on jo altistunut lukuisille jäätymis-sulamissykleille. Liikennekuormitus on ajan saatossa aiheuttanut savipitoisten pohjamaiden lujittumista siten, että saven rakenne poikkeaa huomattavasti luonnontilaisesta, eivätkä mikro- tai makrotason rakenteelliset muutokset voi muodostua kovin merkittäviksi. Yhdenkään monitorointikohteen pohjamaa ei myöskään GEO-luokituksen mukaan ollut puhtaasti savea.

Sulamisen aiheuttama resilient-moduulin pieneneminen on todettu useissa tutkimuksissa niin merkittäväksi erilaisilla maamateriaaleilla, että näiden ratakohteidenkin tapauksessa se olisi johdonmukaisin selitys painumiselle, jota ei raidesepelin kulumisella ole mahdollista selittää. Näytteenottojen perusteella rakennemateriaalit monitorointikohteissa olivat pelkän rakeisuuden perusteella suhteellisen hyviä ottamatta kantaa kiviaineksen raemuotoon tai pintaominaisuuksiin, joita ei tässä tutkimuksessa käsitelty. Resilient-moduuliin vaikuttavista tekijöistä kosteustilan muuttuminen jää ainoaksi, jolla on merkittävää vaikutusta rakenteen kuormituskestävyyteen. Välittömästi routimisen synnyttämien jäälinssien sulettua pohjamaan kantavuus alenee merkittävästi. Samaan aikaan rakennekerroksista sulavan jään myötä kerrosten jäykkyys pienenee, kun jäästä vapautuva vesi ei välittömästi järjesty rakeiden kosketuspintojen ympärille vaan kasvattaa maakerroksen kyllästysastetta muodostumispaikkansa ympäristössä. Tällöin välittömästi sulamisen jälkeen rakenne kokee kantavuudeltaan vuoden heikoimman hetkensä, ja jokainen kuormituskerta aiheuttaa todennäköisimmin suurimmat pysyvät muodonmuutokset kuin minään muuna aikana vuodesta. Sulamisen yhteydessä syntyvät merkittävät painumat saattavat raidesepelin kulumisnopeushavaintojen perusteella johtua osittain talven aikana hienontuneen sepelin tiivistymisestä, mutta erityisesti selvästi routineiden kohteiden tapauksessa liiallinen tai rakenteessa epäsuotuisasti sijaitseva vesi aiheuttaa kantavuuden alenemista, jota tulisi tutkia lisää.

Jatkotutkimussuosituks

Tässä tutkimuksessa ei käsitelty havaittujen painumien yhteyttä radan tarkastuksessa mitattuihin geometriavirheisiin. Koska sulamispainumien todettiin muodostavan merkittävän osan vuotuisesta kokonaispainumasta, olisi tämän yhteyden selvittäminen tarkoituksenmukaista. Mikäli geometriavirheitä esiintyy muusta ympäristöstä poik-

keavasti painumisesta kärsivillä paikoilla, voidaan painumisella todeta olevan vaikutusta radan kunnossapitotyön määrään.

Rakenteen eri osien muodonmuutoksia välittömästi sulamisen jälkeen havainnoimalla saataisiin tarkempaa selvyyttä siitä, missä kerroksessa suurin osa muodonmuutoksista tapahtuu ongelmallisissa paikoissa. Samalla voitaisiin mitata kuinka suurista kantavuuden muutoksista routivat kohteet kärsivät, kun vertailu tehtäisiin muina vuoden aikoina suoritettuihin mittauksiin. Tällöin voitaisiin havainnoida myös yksittäisten akselien ja junien ylityksistä syntyvien pysyvien muodonmuutosten suuruutta, ja erityisesti sitä, kuinka suuria pysyvät muodonmuutokset ovat palautuvien painumien ollessa RATO 3:n sallimalla 1...10 mm:n alueella.

Rakenteen laadun vaikutuksen selvittämiseksi jäykkyysmittauksien suorittaminen myös sellaisella rataosalla, joka vastaa täysin nykyohjeita ja vaatimuksia, antaisi tietoa, kuinka painuminen riippuu rakenteen ominaisuuksista. Tässä tutkimuksessa monitoroitujen kohteiden rakeisuudet vastasivat pitkälti nykyisiä rakeisuusvaatimuksia, mutta rakennepaksuudet alittivat nykyvaatimukset suurimmassa osassa kohteita. Materiaalien vedenpidätyskyvyn vaikutuksen selvittäminen sekä nykyisten että vanhojen materiaalien vertailu tältä osin toisivat lisää tietoa kosteuden roolista rakenteen mekaanisessa toiminnassa.

LÄHTEET

Andersland, O. B. & Ladanyi, B. 2004. Frozen ground engineering. 2nd ed. Hoboken, New Jersey. John Wiley & Sons, Inc. 363 p.

Brecciaroli, F. & Kolisoja, P. 2006. Deformation behaviour of railway embankment materials under repeated loading: Literature review. Publications of Finnish Rail Administration A 5/2006. Helsinki, Finnish Rail Administration. 201 p.

Cernica, C. 1995. Geotechnical Engineering Soil Mechanics. 1st ed. John Wiley & Sons, Inc. 453 p.

Chamberlain, E. J. 1989. Physical changes in clays due to frost action and their effect on engineering structures. VTT Symposium 95 Frost in Geotechnical Engineering, Saariselkä, Finland, March 13-15, 1989. Espoo, VTT. Vol 2 pp. 863–893

Craig, R. F. 2001. Soil Mechanics. 6th ed. Lontoo, Spon Press. 485 p.

Crowther, G. S. 1992. Estimating thaw-strain settlement of frozen fill. Journal of Cold Regions Engineering. Vol. 6, pp. 152-159

Dawson, A., Kolisoja, P. 2004. Permanent deformation. Final Report of the Project Roadex II – Northern Periphery. 47 p.

Ehrola, E. 1996. Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Rakennustieto Oy. Helsinki. 337 s. + 6 liites.

Eurokoodin soveltamisohje Geotekninen suunnittelu – NCCI 7. 28.12.2010. Siltojen ja pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. Liikenneviraston ohjeita 32/2010. Helsinki, Liikennevirasto. 68 s.

Fourie, W. J., Barnes, D. L. & Shur, Y. 2007. The formation of ice from the infiltration of water into a frozen coarse grained soil. Cold Regions Science and Technology. Vol. 48 pp. 118-128.

Fredlund, D. G., Bergan, A. T. & Sauer, E. K. 1975. Deformation Characterization of Subgrade Soils for Highways and Runways in Northern Environments. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 12. pp. 213–223

- Hietala, P., Luomala, H. & Nurmikolu, A. 2010. Rakennekerrosmateriaalien routimisherkkyyks Törnio-Kolari-rataosalla; Laboratoriotutkimukset kesän 2009 näytteille ja roudan monitorointikohteiden havainnot. Tampereen Teknillinen Yliopisto, Maa- ja pohjarakenteet. 49 s.
- Janoo, V. C., Eaton, R. & Barna, L. 1997. Evaluation of Airport Subsurface Materials. CRREL Special Report 97-13. US Army Corps of Engineers. 26 p.
- Johansen, Ø. 1982. Termisk dimensjonering av jernbanefundamenter. Frostsikring med isolasjon. Frost i jord nr. 24, Juni 1982. Oslo. ss. 27-38
- Konrad, J-M. & Morgenstern, N. R. 1981. The segregation potential of a freezing soil. Canadian Geotechnical Journal Vol. 18. pp. 482–491
- Kujala, K. & Laurinen, K. 1989. Freeze-thaw effects on thaw settlement and pore pressure. VTT Symposium 95, Frost in Geotechnical Engineering, Saariselkä, Finland, March 13-15, 1989. Espoo, VTT. Vol 2 pp. 523–533
- Ladanyi, B. & Shen, M. 1989. Mechanics of freezing and thawing in soils. VTT Symposium 94, Frost in Geotechnical Engineering, Saariselkä, Finland, March 13-15, 1989. Espoo, VTT. Vol 1 pp. 73–103
- Leroueil, S., Magnan, J-P & Tavenas, F. 1990. Embankments on soft clays. 1st English ed. Ellis Horwood Limited. 360 p.
- Luomala, H. 2010. Ratapenkereen monitorointi. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2010. Helsinki. Liikennevirasto. 85 s. + 10 liites.
- Nixon, J. F. 1982. Field frost heave predictions using the segregation potential concept. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 19, pp. 526–529
- Nixon, J. F. & McRoberts, E. C. 1973. A study of some factors affecting the thawing of frozen soils. Canadian Geotechnical Journal Vol. 10. pp. 439–452
- Nixon, J. F. & Morgenstern, N. R. 1973. The Residual Stress in Thawing Soils. Canadian Geotechnical Journal Vol. 10(4). pp. 571–580
- Nurmikolu, A. 2000. Raidesepelin lujuuden vaikutus tukikerroksen kestoikään. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu, rakennustekniikan osasto, rakennusgeologian laitos. 103 s. + 34 liites.

Nurmikolu, A. 2004. Murskatun kalliokiviaineksen hienoneminen ja routivuus radan rakennekerroksissa. Kirjallisuusselvitys. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4/2004. Helsinki. Ratahallintokeskus. 193 s.

Nurmikolu, A. 2006. Ratarakenteessa käytettävien kalliomurskeiden hienoneminen ja routimisherkkyyys. Kokeellinen tutkimusosuus. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 9/2006. Helsinki. Ratahallintokeskus. 170 s. + 44 liites.

Nurmikolu, A., Kolisoja, P. 2001. Tutkimusraportti: EPS-routalevyt ratarakenteessa – Kuntotilan arviointi Limingassa km 721+800 – 722+360. Osa tutkimusprojektista: ”Tukikerroksen vaihto koalueella Vihanti-Oulu (km 721–726)”. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennetekniikan laitos, Pohja- ja maarakenteiden laboratorio. Julkaisematon. 16 s.

Nurmikolu, A., Kolisoja, P. 2010. Sepelinpuhdistuksen vaikutukset raidesepelin ominaisuuksiin. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 11/2010. Helsinki. Liikennevirasto. 64 s. + 32 liites.

Penttilä, J. 2012. Havaitun ja laskennallisen roudan syvyyden ja routanousun vertailu radalla. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan laitos, maa- ja pohjarakenteiden yksikkö. 113 s. + 42 liites.

Phukan, A. 1985. Frozen ground engineering. 1st ed. Engelwood Cliffs, New Jersey. Prentice-Hall, Inc. 336 p.

Ratatekniset ohjeet (RATO) Osa 3 Radan rakenne. 2008. Ratahallintokeskus. 50 s. + 27 liites.

Ratatekniset ohjeet (RATO) Osa 13 Radan tarkastus. 2004. Ratahallintokeskus. 51 s. + 28 liites.

Roudan hallintaraportti 2012. VR Track Oy. 2012. Liikennevirasto. 34 s. + 66 liites.

Ryynänen, T., Lämsä, V. P., Belt, J. & Ehrola, E. 2004. Kelirikon vaikeus ja painorajoitukset. Vähäliikenteisten teiden taloudellinen ylläpito – tutkimusohjelma. Tiehallinnon selvityksiä 28/2004. Helsinki. Tiehallinto. 50 s.

Saarinen, M. 2008. Ratojen alusrakenteissa käytettyjen materiaalien routimisherkkyyys. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 7/2008. Helsinki. Ratahallintokeskus. 75 s. + 15 liites.

SFS-EN 1997. 2005. Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Osa 1: Yleiset säännöt. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto SFS. 155 s.

Simonsen, E., Janoo, V. C. & Isacsson, U. 2002. Resilient properties of Unbound Road Materials during Seasonal Frost Conditions. *Journal of Cold Regions Engineering*. Vol. 16. pp. 28–50

Simonsen, E., Isacsson, U. 1999. Thaw weakening of pavement structures in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*. Vol. 29. pp. 135–151

Suomen rautatietilasto 2009. Helsinki. Ratahallintokeskus. 51 s.

Suomen rautatietilasto 2010. Liikenneviraston tilastoja 6/2010. Helsinki. Liikennevirasto. 52 s.

Suomen rautatietilasto 2011. Liikenneviraston tilastoja 5/2011. Helsinki. Liikennevirasto. 52 s.

Suomen rautatietilasto 2012. Liikenneviraston tilastoja 4/2012. Helsinki. Liikennevirasto. 52 s.

Tien perustamistavan valinta, Suunnitteluvaiheen ohjaus. 2003. Helsinki. Tiehallinto. 51 s.

Tiepenkereiden ja –leikkausten suunnittelu. Tien pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. Liikenneviraston ohjeita 9/2010. Helsinki. Liikennevirasto. 107 s.

Tsyтовich, N. A. 1975. The mechanics of frozen ground. 1975. Washington D.C. Scripta Book Company, McGraw-Hill. 426 p.

Vähäaho, I., Lappalainen, V. & Ryhänen, H. 1989. Thaw consolidation of frozen clays of post-glacial origin in Helsinki. VTT Symposium 95, Frost in geotechnical engineering, Saariselkä, Finland, March 13–15, 1989. Espoo, VTT. Vol 2 pp. 583–600

Williams, P. J., Smith, M. W. 1989. The Frozen Earth Fundamentals of geocryology. 3rd ed. Cambridge. Cambridge University Press. 306 p.